

# 风力发电技术及其仿真分析

刁统山 著

電子工業出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京 • BEIJING

## 内 容 简 介

本书介绍风力发电技术及其仿真, 内容包括风力发电系统的基本知识、风力发电系统的 MATLAB 仿真基础、风力发电系统 Ansoft 有限元仿真基础、双馈风力发电系统及其仿真分析、双转子风力发电系统及其仿真分析、永磁风力发电机振动及其有限元仿真分析、风力发电技术中的偏航电控系统、基于 PLC 的风力发电系统偏航程序设计等。此外, 本书还介绍了当前风电研究常用的两个仿真软件 MATLAB/Simulink 和 Ansoft, 并结合相关理论知识进行了仿真研究与分析。

本书可供从事风力发电技术的人员使用, 也可作为高等学校相关专业学生的参考书。

未经许可, 不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。  
版权所有, 侵权必究。

## 图书在版编目(CIP)数据

风力发电技术及其仿真分析/刁统山著. —北京: 电子工业出版社, 2018.11  
ISBN 978-7-121-34492-3

I. ①风… II. ①刁… III. ①风力发电—仿真系统—研究 IV. ①TM614

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 125875 号

策划编辑: 杜 军

责任编辑: 谭海平 特约编辑: 王 崧

印 刷:

装 订:

出版发行: 电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

开 本: 787×1092 1/16 印张: 13.5 字数: 345.6 千字

版 次: 2018 年 11 月第 1 版

印 次: 2018 年 11 月第 1 次印刷

定 价: 59.00 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题, 请向购买书店调换。若书店售缺, 请与本社发行部联系, 联系及邮购电话: (010) 88254888, 88258888。

质量投诉请发邮件至 [zltz@phei.com.cn](mailto:zltz@phei.com.cn), 盗版侵权举报请发邮件至 [dbqq@phei.com.cn](mailto:dbqq@phei.com.cn)。

本书咨询联系方式: (010) 88254552。

# 前言

风能作为一种清洁的可再生能源，是解决所有人类面临的环境污染和能源短缺的必然选择。使用风力发电，可减少常规能源的使用，减少废气的形成，有利于良好空气环境和生态平衡的维持，对我国乃至世界的能源开发和利用非常有利。

我国目前风力发电研究技术的发展、核心装置的设计和加工、风能的生产和后续的利用等一系列环节，都有了一定的提高，风电技术在国民经济领域产生的经济效益和社会效益日益凸显。虽然我国是最早利用风能的国家，但是风力发电技术特别是理论研发方面起步较晚，目前与世界先进风力发电技术相比还存在不小的差距。

目前风力发电技术的开发与设计，主要采用模拟实际的多功能仿真软件进行，这些软件包括 MATLAB/Simulink 和 Ansoft 等。MATLAB/Simulink 和 Ansoft 各有侧重：在 MATLAB 中，风力发电机各组件可通过编程或通过 Simulink 库模块搭建模型来实现仿真；Ansoft 软件偏重于风力发电机的结构和电磁场的计算，可对风力发电机的设计进行优化。本书共分 8 章，内容包括风力发电系统的基本知识、风力发电系统的 MATLAB 仿真基础、风力发电系统 Ansoft 有限元仿真基础、双馈风力发电系统及其仿真分析、双转子风力发电系统及其仿真分析、永磁风力发电机振动及其有限元分析、风力发电技术中的偏航电控系统、基于 PLC 的风力发电系统偏航程序设计。在此基础上，借助 MATLAB/Simulink 和 Ansoft 仿真软件，通过大量实例对相关理论知识点做了详细的仿真研究和分析。

本书作者为齐鲁工业大学（山东省科学院）教师，本书的写作得到了齐鲁工业大学（山东省科学院）电气工程与自动化学院的大力支持和帮助，在此表示衷心的感谢！还要感谢电子工业出版社的杜军编辑为本书的出版所做的工作！

由于作者水平有限，加之时间仓促，书中内容不妥之处在所难免，恳请各位专家和学者批评指正！

作者

2018 年 6 月

# 目 录

第 1 章 风力发电系统的基本知识	1
1.1 风力发电系统的主要类型和结构	1
1.1.1 风力发电系统的主要种类	1
1.1.2 风力发电系统的结构	4
1.2 风力发电机的主要类型	9
1.3 风力发电技术研究的热点问题	11
1.3.1 风力发电输出功率的预测	11
1.3.2 低电压穿越	13
1.3.3 风力发电场中的并网控制技术	14
1.4 风力发电技术的发展趋势	15
1.5 风力发电机的仿真技术	15
第 2 章 风力发电系统的 MATLAB 仿真基础	17
2.1 MATLAB 工作窗口	17
2.1.1 MATLAB 的窗口及其说明	17
2.1.2 MATLAB 菜单项的功能说明	18
2.2 MATLAB 运行常识	19
2.3 MATLAB 程序的基本说明	21
2.4 MATLAB 常用命令与函数	21
2.5 MATLAB 基本操作	22
2.6 Simulink 简介	23
2.6.1 Simulink 概述	23
2.6.2 Simulink 的简单操作	23
2.6.3 MATLAB 电力系统模块库的使用	30
2.6.4 Simulink 的简单操作	31
2.7 MATLAB 仿真软件在风力发电系统分析中的应用	32
2.7.1 单相桥式整流电路的 Simulink 建模	33
2.7.2 三相桥式整流电路的 Simulink 动态建模分析	36
2.7.3 输电线路出现故障时的建模和仿真分析	39
第 3 章 风力发电系统 Ansoft 有限元仿真基础	47
3.1 RMxpert 在发电机仿真中的基本操作	47
3.1.1 建模方法	48
3.1.2 发电机模型创建	48
3.1.3 发电机主要结构变量的输入	50
3.1.4 转子尺寸的输入	56
3.1.5 转轴参数选定	58
3.1.6 电动机仿真参数选定	59



3.1.7 发电机的仿真运行 .....	60
3.2 RMxpirt 和 Maxwell 2D 联合仿真 .....	62
3.2.1 RMxpirt 环境中发电机模型生成 2D 模型的操作 .....	62
3.2.2 仿真运行曲线的输出 .....	63
<b>第 4 章 双馈风力发电系统及其仿真分析 .....</b>	<b>66</b>
4.1 双馈风力发电系统的主要结构部件和运行原理 .....	67
4.1.1 风力发电中 PWM 的相关技术规定 .....	67
4.1.2 双馈风力发电机运行原理 .....	69
4.1.3 双馈风力发电机的功率关系 .....	71
4.2 双馈风力发电机的数学模型 .....	73
4.2.1 双馈风力发电机三相静止坐标系下的数学模型 .....	73
4.2.2 双馈风力发电机数学模型的坐标变换 .....	75
4.2.3 双馈风力发电机在任意转速坐标系中的模型 .....	76
4.3 双馈风力发电机稳态并网的调节方法 .....	77
4.3.1 网侧 PWM 变换器的建模与控制 .....	77
4.3.2 GSC 在旋转坐标系中的建模 .....	80
4.3.3 双馈风力发电机相量调节方法 .....	81
4.3.4 双馈风力发电机的稳态性能 .....	83
4.4 交流三相电网电压突然降落时双馈风力发电系统的仿真研究 .....	87
4.4.1 交流三相电网电压突然降落时的 RSC 控制方法 .....	87
4.4.2 三相交流电网电压突然降落时 GSC 应采取的措施 .....	89
4.4.3 电网电压小幅降落时双馈风力发电机控制策略仿真分析 .....	91
4.5 基于 SimPowerSystems 的双馈风力发电系统仿真实例 .....	92
<b>第 5 章 双转子风力发电系统及其仿真分析 .....</b>	<b>99</b>
5.1 双转子风力发电机系统的结构和数学模型 .....	99
5.1.1 双转子风力发电机的结构 .....	99
5.1.2 双转子风力发电机在三相静止坐标系中的数学模型 .....	100
5.1.3 双转子风力发电机在两相旋转坐标系中的数学模型 .....	106
5.1.4 双转子风力发电机在任意旋转坐标系中的数学模型 .....	107
5.2 双转子风力发电系统的稳态并网控制研究 .....	108
5.2.1 双转子风力发电系统转子侧变换器相量控制 .....	108
5.2.2 双转子风力发电机的稳态运行研究 .....	110
5.3 电网电压骤降故障状态下双转子风力发电机的控制策略 .....	115
5.3.1 电压骤降故障状态下转子侧变换器控制策略 .....	117
5.3.2 电网电压突降时双转子风力发电系统改进调节研究 .....	120
5.3.3 电压降落时双转子风力发电系统动态仿真 .....	121
5.4 电网电压不平衡或不对称降落仿真分析 .....	122
5.4.1 电网电压出现不平衡分量时的功率和转矩 .....	125
5.4.2 双转子风力发电机在电压不平衡时的研究 .....	126
5.4.3 双转子风力发电系统在电网电压不平衡时的控制仿真研究 .....	128
5.5 电网严重故障低电压穿越运行仿真 .....	133
5.5.1 基于撬棒保护装置的低电压穿越的仿真分析 .....	134

5.5.2	电网三相对称短路故障时低电压穿越运行仿真	139
5.5.3	电压降落较长时间时低电压穿越研究	143
<b>第 6 章</b>	<b>永磁风力发电机振动及其有限元分析</b>	<b>147</b>
6.1	风力系统发电机简介	147
6.1.1	直驱风力发电机	147
6.1.2	双馈风力发电系统	148
6.2	永磁同步发电机	149
6.2.1	结构	149
6.2.2	永磁同步发电机的运行原理	151
6.2.3	永磁发电机振动机理及其分析方法研究	153
6.2.4	基于能量法的永磁发电机齿槽转矩削弱原理	158
6.3	永磁同步发电机齿槽转矩有限元仿真	160
6.3.1	永磁发电机本体构建	160
6.3.2	齿槽转矩仿真	164
6.4	直驱永磁同步风力发电系统 MATLAB 仿真	166
6.4.1	数学建模	166
6.4.2	永磁同步风力发电系统的控制策略	169
6.4.3	仿真分析	170
<b>第 7 章</b>	<b>风力发电技术中的偏航电控系统</b>	<b>172</b>
7.1	偏航电控系统简介	173
7.2	偏航系统正常运行的条件	173
7.3	偏航电控系统结构	175
7.4	偏航电控系统工作原理	177
7.5	自动偏航控制过程分析	180
7.6	偏航电控系统的维护和保养	186
<b>第 8 章</b>	<b>基于 PLC 的风力发电系统偏航程序设计</b>	<b>189</b>
8.1	PLC 介绍	189
8.1.1	PLC 的基本组成	189
8.1.2	PLC 的工作原理	190
8.2	PLC 的选型	191
8.2.1	德国西门子公司生产的 S7-200 PLC 及特点	191
8.2.2	PLC 技术参数	193
8.3	中央处理器的工作方式	195
8.4	扩展模块	195
8.4.1	扩展模块简介	195
8.4.2	S7-200 PLC 内部触点和数据概述	196
8.5	基于 PLC 偏航系统的主要设备及系统控制要求与实现	200
8.5.1	PLC 偏航系统的主要设备及系统控制要求	200
8.5.2	基于 PLC 偏航系统的程序实现	200
8.5.3	偏航驱动电气控制原理	206
	<b>参考文献</b>	<b>208</b>

# 第 1 章 风力发电系统的基本知识

在能源枯竭和环境不断恶化的今天，风能作为无污染的可再生能源之一，其开发和利用逐渐引发人们的广泛关注，风力发电系统的优化和控制可再生能源利用方面也发挥着越来越大的作用。我国陆地疆域辽阔，海岸线长 2 万多千米，由此可知我国是风力能源蕴藏量巨大的国家之一。当前，我国新增装机数量和累计装机数量两项数据均居世界前列。风力发电的规模不断扩大，大容量风力发电场的并入对电网的运行性能和保护装置造成了许多不利影响，主要表现在影响电网电压的质量方面，如电网电压波动频繁、谐波严重等。以上问题的解决，必须依靠新风力发电相关技术的研究，特别是在目前作为热点的风力发电中，关于穿透功率如何提高、风力发电产生的功率如何提前准确预测等问题的研究，这些研究必须取得新的进展。由于风能具有随机不确定性和波动性，加之风力发电装机容量占电网总容量的比例不断增大，因此要求能够减小风力发电场并网时对电网的冲击。现阶段，在风力发电技术并网发展过程中，要解决许多关键性的技术问题。以下详细介绍风力发电系统的基本类型和结构、风力发电机的主要机型、风力发电技术研究的热点问题、风力发电技术的发展趋势和风力发电机的仿真技术。

## 1.1 风力发电系统的主要类型和结构

### 1.1.1 风力发电系统的主要种类

在风力发电技术领域，风力发电机组是特别重要的核心设备之一，其性能参数很大程度上会影响到风力发电系统的诸多经济和技术指标。因此，必须高度重视风力发电机的选型，因为这个问题涉及所有风力发电的正常、高效运行。风力发电机性能的好坏不仅决定了整个机组的无故障运行年限，而且决定了风能转化和利用的程度，毫不夸张地说，一个风力发电机组的运行状态有时会影响到整个电力系统的正常运行。从总体上说，风力发电技术是一个十分重要的学术分支，它涉及电气控制、机械制造和自动化等多学科技术层面。

了解风力发电系统的基本组成和工作原理，对进行风力发电机组的设计与开发利用非常重要。只有从整体上全面、系统地认识风力发电机组，才能设计和构建出结构合理、运行效果良好的风力发电系统。

目前，风力发电机通常按功率大小、传动形式和结构等进行分类，如下所述。

#### 1. 依据风力发电机功率的大小分类

依据风力发电机的额定功率大小，风力发电机组通常可以分为小型风力发电机（额定功率范围为 0.1~1kW）、中型风力发电机（额定功率范围为 1~100kW）、大型风力发电机（额定功率范围为 100~1000kW）和特大型风力发电机（额定功率通常在 1000kW 以上）。

今天, 2MW 和 3MW 左右的风力发电机已在我国风力发电领域出现, 额定功率更大的特大型风力发电装置不久也会进入应用领域。

## 2. 依据风力发电机旋转主轴的方向分类

风力发电机组中, 风轮机的功能是最大化地接收通过风轮旋转面的流动空气的全部动能, 并将其转换为在风力发电系统轴上输出的机械能, 换句话说, 风轮机在风力发电系统中的作用是把风能转化为机械能。按照风轮机旋转主轴的空间位置划分, 风轮机一般分为两大类, 即水平轴风轮机和垂直轴风轮机。水平轴风轮机须具有改变方向的装置, 风轮位置应处于塔架的最上端, 只有这样, 才能尽可能捕获风能。垂直轴风轮机的风轮一般不需要额外增加调节方向的装置, 风轮的安装位置可根据需要来选择。为了维修和安装方便, 大多数此类风轮机安装在离地面较近的塔架上。

(1) 水平轴风力发电机。风轮机的主轴总是保持与风向平行, 正常运行时, 其旋转平面与风向成  $90^\circ$  夹角。水平轴风力发电机的安装实物图如图 1.1 所示, 由图可知这类风轮机运行时, 风叶掠过的面积很大, 风能转化效率通常较高, 加之其调节技术相对完善, 因此目前仍然是风力发电领域应用的热点机型。

(2) 垂直轴风力发电机。风轮轴垂直正对风向, 安装实物图如图 1.2 所示。由图可知这种结构的风轮机可以捕获来自四面八方的风能。众所周知, 空气流动形成的风的方向多变, 无论风向如何变化, 该种风轮都能够捕获风能, 而不需要专门安装调节转向的装置, 因此故障率和维修量相对较小。减速机构和发电机本体能够安放在地面上, 因此有利于后期的保养和维修。除具有上述优点外, 其缺点是风轮机高效捕获风能的控制技术还不完善, 因此风能的转化效率不高, 且当风速较低时风轮机不容易启动。因此, 目前在风力发电领域垂直轴风力发电机的使用受到了很大的限制。



图 1.1 水平轴风力发电机



图 1.2 垂直轴风力发电机

水平轴风力发电机和垂直轴风力发电的风轮，必须通过齿轮箱等速度调节装置来实现速度的变化。一般来说，速度的变化通过齿轮传动变速机构来实现，齿轮传动变速机构将风轮机从流动空气中捕捉的能量转换为风力发电机转子的动能。综上所述，当风力发电机的额定容量不大时或风力发电机转子的速度不高时，可省去调速的机械装置。

### 3. 依据风力发电机功率的调整方法分类

依据功率的调整方法分类及机组特征如表 1.1 所示。

表 1.1 依据功率的调整方法分类及机组特征

依据功率的调整方法分类	机组特征
定桨距控制风力发电机	风轮机的叶片和轮毂固定相连，风轮机的叶片无法调节。要调节风力发电机的功率输出，只能想办法改变叶片的气动性能。实际风速大于额定风速时，可以控制叶片动力参数，达到减小风轮机的旋转力而最终维持功率不变的目的
一般变桨距控制风力发电机	实际风速大于额定风速时，可以调节翼片上的气流方向，即减小翼片角，使动力矩不变，进而达到稳定功率的目的
主动失速型风力发电机	这种调节措施在机组输出的功率达到额定值时，会使功角变大，叶片的失速效果加强，从而降低风能的转化效率

### 4. 依据风力发电系统的传动方式分类

风力发电机组按传动的方式分类及各类型的组成与特点如表 1.2 所示。

表 1.2 按传动方式分类及各类型的组成与特点

按传动方式分类	组成与特点
高速传动比齿轮箱型	齿轮箱把风能通过风轮机时生成的动力传送给发电机，然后将其变成相应的转速。受直径和风能的限制，风轮机的转速通常情况下很低，满足不了发电机正常发电的指标要求，需要采用增加齿轮箱的办法
直接驱动型	采用多级同步发电机，可省去常见的传动系统，使风轮直接拖动发电机的转子运转。在低速状态下，不存在传动系统所带来的噪声、故障率高和维护成本大等问题，提高了运行可靠性
中速传动比齿轮箱型	这种风力发电机组的工作原理是上述两种形式的综合。中速传动比齿轮箱型风力发电机组降低了传统齿轮箱的传动比，同时相应减少了多级同步发电机的级数，从而减小了发电机的体积

### 5. 依据风力发电机组叶轮的转速是否变化分类

(1) 恒定速。恒定速风力发电机组定义为发电机转子的转速保持不变时，风能的输出不会随风速的大小改变而发生相应的改变。

(2) 多态定速。多态定速通常是指存在两台或两台以上的风力发电机时，按照转速的不断变化，需要将不同功率和台数的风力发电机切换为运行状态。

(3) 变速。变速是指发电机工作时，转子转速随风速大小时刻发生改变的情况。由于这种风力发电机群的机械应力小、成本低、效率高，因此主流的大型风力发电机组都采用变速恒频运行方式。

最常见的大型风力发电机组主要有恒速恒频发电机组和变速恒频发电机组<sup>[1~6]</sup>。

### 1.1.2 风力发电系统的结构

风力发电系统一般分为 4 部分，即风轮机构、风力发电机舱、位于底部的风力发电系统的基础，以及安装风轮和机舱的塔架，如图 1.3 所示。风力发电系统将风能转化为电能的原理简述如下：风力发电机启动后，将捕获的风能转换为风轮机高速旋转的动能，高速转动的风轮带动机械传动部件运动，使得风力发电机的转子旋转，完成启动；随着转子转速的不断提高，发电机的定子侧输出电能。综上所述，风力发电系统的主要作用就是把风能转换为机械能，然后通过风力发电机把机械能转换为电能。

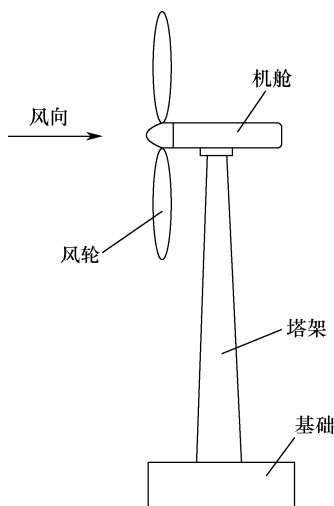


图 1.3 风力发电系统组成示意图

#### 1. 风力发电系统整体结构的基础

风力发电系统要能够平稳运行，位于下部起固定系统作用的基础就必须满足设计要求，否则就会因为在运行中产生过大震动而发生损坏。基础作为风力发电系统最主要的承载部件，承担了机组的全部竖向荷载和水平荷载，这些荷载的大致来源包括：风轮、机舱和塔架的重量，来自不同方向的风荷载，风轮旋转产生的震动力矩，系统偏航运行时出现的扭矩综合荷载等。

因为钢筋混凝土基础对固定在其上的部件的支撑效果非常好，所以迄今为止国内外较大规模的风力发电系统均采用钢筋混凝土结构作为基础，如图 1.4 所示。依据基础的结构外形进行分类，基础一般分为厚板块、多桩和单桩等结构形式。地表接近硬性土质时，首选梁板式基础结构；地层土质疏松时，应选择桩基础结构。

#### 2. 风力发电系统的塔架

主流大规模风力发电系统均使用圆筒形钢制塔架结构，因为其抗震能力较强。塔架是风力发电系统的关键承载部件之一，其主要功能是将机组上部产生的荷载传递给基础。塔架的组成包括塔筒、塔门、爬梯、平台、电缆支架和照明装置，还包括在某些塔筒内布置的升降机构。圆筒式塔架实物图如图 1.5 所示，其具体组成及各部分的作用如表 1.3 所示。

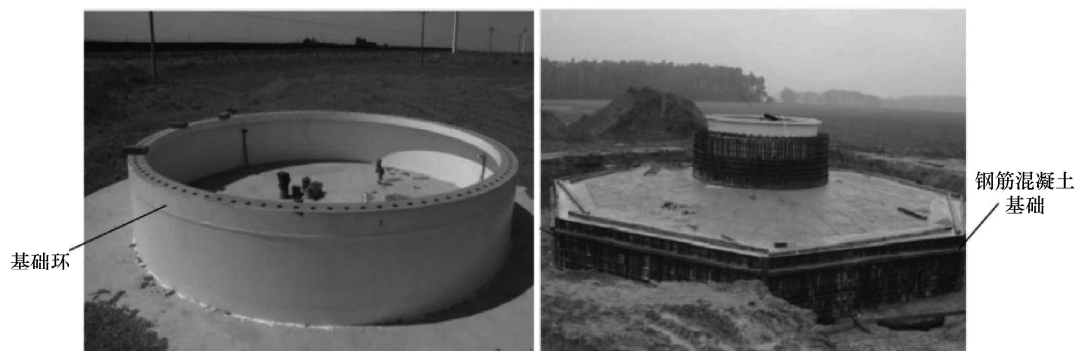


图 1.4 风力发电系统基础实物图



图 1.5 圆筒式塔架实物图

表 1.3 圆筒式塔架组成部分及其说明

圆筒式塔架组成部分	说 明
塔筒	塔筒是塔架的主要支撑受力部分。目前，风轮塔架的高度为 60~90 米。为使吊装和运输方便，一般将塔架分为若干塔筒，在下段塔筒底部的内/外侧或单侧设有法兰盘，在其余连接段的内侧也设有法兰盘，采用螺栓连接。塔架的高度决定风力发电机组的高度，通常高度越高，风力越大。由于风力发电场的风速不同，为了在最佳的风速下运行，塔架的高度也不相同
平台	为安装相邻段塔筒并供检修人员在攀爬中休息，塔架中设有若干平台。通常在塔门位置设有一个基础平台，在中间段设有 2~3 个检修平台
内外爬梯	为了检修方便，从地面到舱门设有外梯，从基础平台到机舱设有内梯或垂直电梯。外梯通常设为倾斜直梯或螺旋梯，内梯通常设为垂直爬梯

### 3. 风力发电机装置的风轮机构

风轮机构可以把风能转换为发电机转子旋转的机械能，因此风轮机构是风力发电系统的关键组成之一。主流风力发电机组通常为水平轴迎风型、双叶型或三叶型，如图 1.6

所示，这几种风力发电机组的风轮系统的功率从几千瓦到几兆瓦不等，具体取决于风轮直径的大小。风轮的组成主要包括叶片、轮毂、导流罩和变桨系统的执行机构。



图 1.6 不同叶片数量的风力发电机

(1) 叶片。风轮机前端旋转的叶片是采集风能的核心器件。叶片结构中的形状设计、材质选用等因素，关系到风力发电转换的性能和输出功率的大小，因此叶片是风力发电机组中至关重要的部件之一。

(2) 轮毂。轮毂是风力发电机组中的重要部件，它连接主轴和叶片，将风轮的扭矩传递给齿轮箱或发电机。轮毂通常有球形和三圆柱形两种。

(3) 变桨系统的执行机构。变桨系统是风力发电机组中调节功率的装置，它由驱动用的电动机、机械变速部分和可调桨距轴承部分组成。在叶片和轮毂之间设置变桨驱动电动机，拖动回转轴承旋转，最终调节叶片的迎风角度，可实时调整叶片的上升浮力，进而相应地调整施加到风轮叶片上的扭矩和输出功率。

(4) 导流罩。导流罩的材质通常是玻璃钢，主要作用是减小风的阻力。

#### 4. 风力发电机舱

风力发电机舱由底盘和机舱罩组成，底盘上安装有控制器和其他部件。机舱罩后上方设有风速和风向检测装置；另外，舱壁的上方还装设有隔音和通风装置，最下部则和塔架相接。机舱上安装有散热器，用于冷却齿轮箱和发电机；同时，在机舱内还安装有加热器，以便风力发电机组在冬季寒冷的环境下，将机舱内的温度保持在 10℃ 以上。

机舱内安装有风力发电机组的大部分传递、发电、控制设备，包括主轴、主轴承、冷却风扇、高速轴、齿轮箱、发电机、液压站、偏航电动机、电控柜、机舱通风扇等，如图 1.7 所示。

#### 5. 增速系统

增速系统中的机械齿轮箱非常重要，其作用是将风轮机传来的动力转换为机械旋转力，启动发电机，并使得转速快速上升到满足发电要求的值，因为通常情况下风速较低，导致风轮转速低，达不到发电机平稳输出电能的要求。



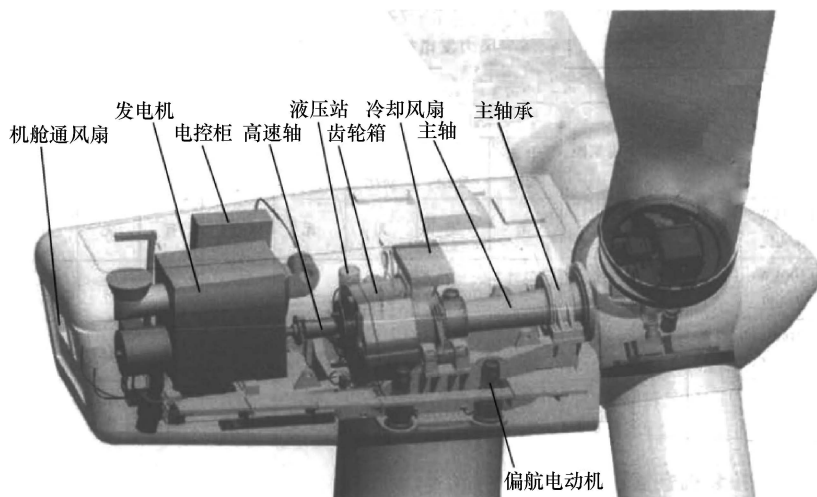


图 1.7 风力发电机机舱内的设备

## 6. 风力发电机组的发电机

众所周知，风力发电机是将不断变化的风能高效转化为电能的电力装置。发电机的种类很多，其工作原理都基于电磁感应定律、电磁学定律和力学定律。

风力发电机由定子绕组和定子铁心、转子绕组和转子铁心、机壳、电机端盖和旋转轴承等组成。转子包括转子轴承、转子铁心、三相交流转子绕组、集电环和散热的风扇等。

风力发电机通常分为同步发电机和异步发电机两种。同步发电机与电网并联运行时，其定子绕组的频率必须和三相交流电网的频率一致，因此有时也称其为交流风力发电机；异步风力发电机运转时，其定子三相绕组的频率和电网的频率不一致，因此又称感应风力发电机。目前，风力发电系统中多采用异步发电机，因为其频率和转速都可调节，可在同步转速上下小幅变动，发电效率和控制效果较好。

同步发电机中的转子必须采用直流绕组励磁，这样才能使转子产生的恒定磁场铰链定子绕组的旋转磁场。因此，转子保持恒定转速，其频率和电网的频率保持不变。在永磁发电机中，转子磁场靠永磁体励磁。

鼠笼式异步发电机的转子为闭合鼠笼形式。转子与发电机之间通过变速机构相连，转子电流产生的原理是电磁感应。由于转子的转速略高于三相空间同步旋转磁场的转速，所以称异步发电机。因此，鼠笼式异步风力发电机转子的转速必须高于同步旋转磁场的转速。

## 7. 风力发电机组的偏航系统

由于自然风风向的不确定性和风的不稳定性，风力发电机组的风轮需要反复偏航对风来获得最大功率。叶片旋转平面和风向的夹角不为  $90^\circ$  时，风能转换为电能的效率就会下降，风力系统的机械冲击应力就会增大，因此需要采取措施来改善这种情况，如采用偏航系统来跟踪风向的变化，可将驱动机舱始终限定在塔架中心，进而使叶片旋转平面和风向的夹角为  $90^\circ$ 。

## 8. 风力发电液压系统

风力发电机组的液压系统是以液体为介质来实现动力传输和运动控制的机械装置，具有传动平稳、功率密度大、容易实现无级调速、易于更换元器件和过载保护等优点。大型风力发电系统广泛应用液压系统来实现偏航制动及转子紧急停车。

## 9. 风力发电制动机构

制动机构是风力发电机组中起制动作用装置的总称，通常由气动制动装置和机械制动装置组成。

(1) 气动制动。风力发电机组正常运行时，叶尖扰流器会使桨叶吸收一定的风能，其动力就来自液压机构。液压系统供应的液压油进入安装在桨片末梢的液压缸，液压缸通过旋转关节并压缩弹簧，使尖端扰流板与刀片体结合。风力涡轮机需要停止时，液压缸放出液压油，由于存在离心力，桨片尖端扰流板旋转超过  $90^\circ$ ，因此在空气阻力下充当刹车。通过改变俯仰角，可实现变桨风力发电系统的气动制动。

(2) 机械制动。风力发电机的刹车装置由刹车用的圆形装置和刹车钳组成。安装在外壳上的刹车钳不活动，刹车的圆形装置和发电机的轴可自由旋转，刹车钳中的弹簧提供预制动力，刹车钳的打开需要利用液压力。因此，刹车装置中主要包括减压阀和弹簧预作用设备。刹车装置的内部可安装检测元件，如检测温度的装置和检测厚度的传感装置。

## 10. 风力发电机组的电气控制系统

风力发电系统中的电气控制系统较为复杂，其主要功能是实时监测电网工况及各项特征量的变化，并根据风速与风向的变化，对机组进行合理的调节和控制，进而达到使机组高效运行的目的。

(1) 电气控制系统的功能。风力发电机组中的电气控制系统有三种功能，分别是正常运行控制功能、运行状态监测功能和安全保护功能。

① 正常运行控制功能。包括系统的启动和停止、发电机连接电网、各种装置的润滑和冷却、无功补偿和系统故障检测。

② 运行状态监测功能。包括监测电压的波动、频率偏差、风速的波动、机构震动等。

③ 安全保护功能。分为微机监测和控制及其他装置、各部分元件的自身监测功能。系统采用两套相互独立的保护机构：一套是可编程逻辑控制器（PLC）控制的保护系统，由 PLC 对安全链的节点进行监控，任何一个节点发生故障时，主控制程序都会向变桨系统发出急停请求；另一套是独立于计算机系统的安全保护，安全保护是一个检测环节，任何一个触发都会导致紧急停机。

(2) 电气控制系统的组成。电气控制系统主要包括成套低压柜、补偿装置、整流装置和系统转速控制装置。电气控制系统的组成及其功能如表 1.4 所示<sup>[6-10]</sup>。

表 1.4 电气控制系统的组成及其功能

电气控制系统名称	功能说明
低压电气柜	主要的配电部分，位于发电机和电力系统之间，系统各部分部件的电能来源于此，也可各部件的动作机构提供电能
电容柜	可通过变流器的整流来提高效率，发电机和整流电路都需要无功功率的补偿

(续表)

电气控制系统名称	功能说明
主控制柜	帮助系统捕获信号、判断信息、控制硬件动作
变流柜	实现电流频率的变换。在双馈发电系统中，为双馈发电机励磁系统提供励磁电流；在永磁同步风力发电系统中，通过变流柜实现非 50Hz 的电网并网
机舱控制柜	接收机舱内的检测信号、极限位置检测信号、发电机的速度信号、系统运行的压力和温度等
变桨控制器	风力机组大于正常转速运行时，调节叶片桨距角来稳定功率；风力发电机停止或风叶轮角度变化时，保证系统安全，不出现过电流和过电压
并网柜	完成联网的作用，减小断路器的电流

## 1.2 风力发电机的主要类型

同步发电机或异步发电机通常用于连接电网的发电系统。同步发电机和异步发电机在风力发电系统中各有优缺点。使用同步发电机时，发电机的电压可通过调节励磁来调节，它可为电网输出一定量的无功功率，使电网的功率因数得到改善。然而，要使用同步风力发电机，必须额外安装转速调节机构，以保证发电机的转子速度不变，即始终以理想的空载速度运行。此外，发电系统的并网连接设备较多，还必须考虑同步发电机的暂态稳定性。众所周知，异步风力发电机类似于普通的异步发电机，其结构简单、易于制造，电机转子的旋转速度可在较宽的范围内调节，可提高风能的转换效率。另外，异步风力发电机并网装置需要的设备较少，因此故障率也较少。使用异步发电机的一个缺点是，正常运行这种风力发电机需要从电网吸收励磁电流，因此会导致电网电压的较小变化，在电网出现故障期间，有可能会使电网的功率因数和电压降低。

按不同结构分类时，风力发电机的种类较多，且各有优缺点。较为常用的风力发电机通常分为三种类型：恒速恒频感应发电机、变速恒频双馈异步发电机和变速恒频直驱永磁同步发电机。变速恒频风力发电机的优点很多，如调速容易、控制方法灵活、易于实现等，因此是目前应用和研究的热点。

第一种常见的风力发电机是恒速恒频感应风力发电机，由这种风力发电机构成的风力发电机系统的结构如图 1.8 所示，按从前端到后端的顺序，分别为接收风能的以风轮为主的风力机、变速齿轮箱、异步发电机、软启动装置及三相并联电容器。采用定桨距失速调节时，风力发电机输出恒定频率电压，感应风力发电机会向电网同时吸收有功功率和无功功率。为解决这一问题，通常采用并联电容器组的方法，使整个电网的功率因数得到改善。风能的不确定性会导致恒速恒频发电系统的风能利用不足，风力发电机的功率输出波动较大，因此这种风力发电系统目前正逐步被变速恒频发电系统取代。

第二种常见的风力发电机是变速恒频双馈异步风力发电机。由于双馈异步风力发电机具有诸多优点，因此正逐渐发展为当今的主流机型，其份额约占总装机容量的 80%。变速恒频双馈异步风力发电系统与传统的恒速恒频系统相比，其最显著的优点是，风力机使用变桨距角控制，因此能根据风能的变化合理地调整桨距角，进而一直让风能得到最大的转化利用。此外，当风力发电机组在紧急情况下被迫停机时，它能把风力机调整为顺桨状态，

有效减少此时的风能捕获，进而减少风力机组的震动和机械冲击，降低机组的故障，达到延长机组使用寿命的目的。

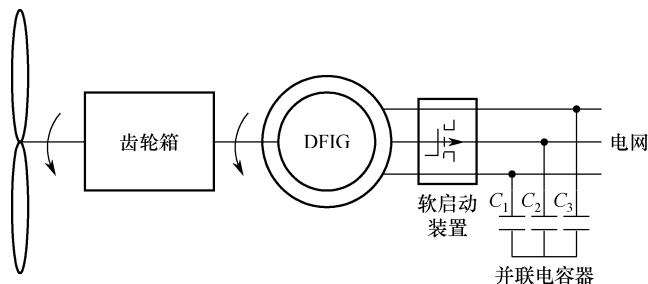


图 1.8 恒速恒频风力发电系统的基本组成

变速恒频双馈异步风力发电系统的基本组成如图 1.9 所示，其发电机的三相定子绕组挂在电网上，发电机的三相转子绕组与转子侧变流器（RSC）相连，经直流母线电容器稳压后，再和网侧变换器（GSC）与电网连接，定子侧变换器和转子侧变换器合称双向背靠背变换器，它们之间有一个起稳压作用的电容器。依靠双 PWM 变换器完成电机的交流励磁，此时与电网相连的定子侧三相绕组能够输出频率不变的电能，能够实现能量的双向交换，因而控制方式较为灵活，控制效果较好。

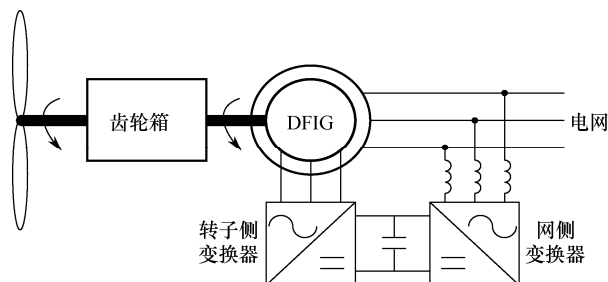


图 1.9 变速恒频双馈异步风力发电系统的基本组成

第三种常见的风力发电机为变速恒频直驱永磁同步发电机。这种系统的风力机和发电机转子直接相连，可直接驱动，大大降低了机械传动所导致的故障，延长了发电系统机械的寿命。变速恒频直驱永磁同步风力发电系统的基本组成如图 1.10 所示，同步风力发电机发出的交流电通过定子绕组传递给转子侧变换器，再传递给网侧变换器，通过网侧变换器将发出的电能输送到电力系统网络。可以看出，永磁发电机采取永磁体进行励磁，不从电网吸收有功电流，省去了电刷和滑环装置，使得发电机结构简单、系统的故障率较小，但缺点是极对数量通常较多，因此会使得发电机本身的结构相对复杂，相应的生产成本投入变大。

风力发电系统接入电网时对电力系统的影响，一直是制约风力发电技术推广的主要障碍。近年来，风力发电控制技术不断提高，大规模风力发电场和电网的联系愈加紧密，导致了电力系统结构和维护方式的改变。为解决这一矛盾，熟悉和掌握并网风力发电系统和电力系统协同发展迫在眉睫。下面主要讨论两方面的问题。

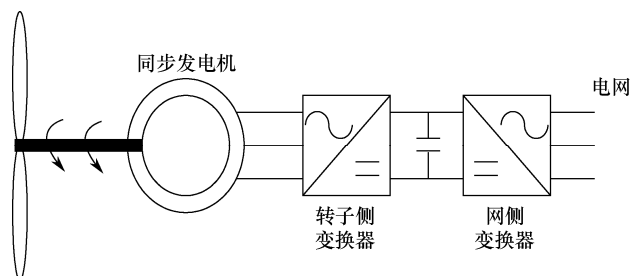


图 1.10 变速恒频直驱永磁同步风力发电系统的基本组成

首先，风力发电场并网后对系统的影响主要是，影响功率在电网中的流动规律。当风力发电场到其供电的负荷处的距离很长时，配电网发电机发出的电能除向负荷侧流动外，还向电网流动，而能量的流动会使得电力传输系统成为双向流动网络，因此必须对电力网络按双电源重新设计继电保护设备，避免风力发电并入电网时出现的电磁涌流。

其次，并网操作直接改变了电网的调度方式。风力发电具有不易预测的特点，而风力发电机组输出的功率与风速的三次方成正比，因此风力发电机组的输出功率会随着风速的变化而大幅度快速变化，风力发电接入电网后，必然会增加电网的备用容量。通常而言，火电发电机组的投运需要较长的时间，电网的冗余容量不充分时，必须采取措施对风力发电连接电网进行约束，否则就会引起在高峰负荷期风能很少，而在低谷负荷期风能发电量大的问题，进而对电网电力调度工作造成一定的困难，导致电压稳定性大大降低。在风力发电系统中，通常采用异步风力发电机，异步风力发电机的励磁通常来自电网，导致电网的无功功率降低，当电网由于故障等原因导致输出的无功功率不足时，就会使得电网电压下降或发生闪变等问题。为避免以上情况的出现，通常利用并联电容器组、静止同步补偿器等方法来减少对电网的影响。大量研究表明，使用 STATCOM（静止同步补偿器）对风力发电场进行动态无功补偿，可达到稳态电压调整、暂态电压调整及改善电能质量的目的，确保风力发电顺利并入交流主电网。

## 1.3 风力发电技术研究的热点问题

由于风力发电容量占电网总容量的比例不断上升，风力发电产业已成为最有潜力规模化和商业化的新能源之一。同时，发电机与局部电网之间的相互影响也日益显著。要解决这一矛盾，需要将风力发电机组和电网视为一个整体来考虑，以便实施有效的系统控制。此时，必须解决以下几方面的问题。

### 1.3.1 风力发电输出功率的预测

在国家电网公司出台的《风力发电功率预测系统功能规范》中，对风力发电功率的定义和时间尺度等做了详细规定。

风力发电功率预测：以风力发电场已经输出的功率、记载的风速、地理位置信息、当地气象条件、风力发电系统当前和历史运行等数据构成风力发电场发出功率的数学模型，

以实测风速、输出功率或气象数据作为输入变量，根据装置实测数据，推测风力发电场后续可能发出功率的大小。

推测时间范围包含短期和超短期。

短期推测：预计从下一天 0 时 0 刻起共计 3 天风力发电场能够输出的有功功率大小是多少，最小识别时间是 15 分钟。

超短期推测：预计接下来从 0 到 4 小时期间的有功功率大小是多少，最小识别时间是 15 分钟。

国内外对于风力发电功率预测的应用和研究主要集中在短期预测方面。目前风能预测分类的主要依据有预测时间尺度、预测方法和预测范围，如图 1.11 所示。

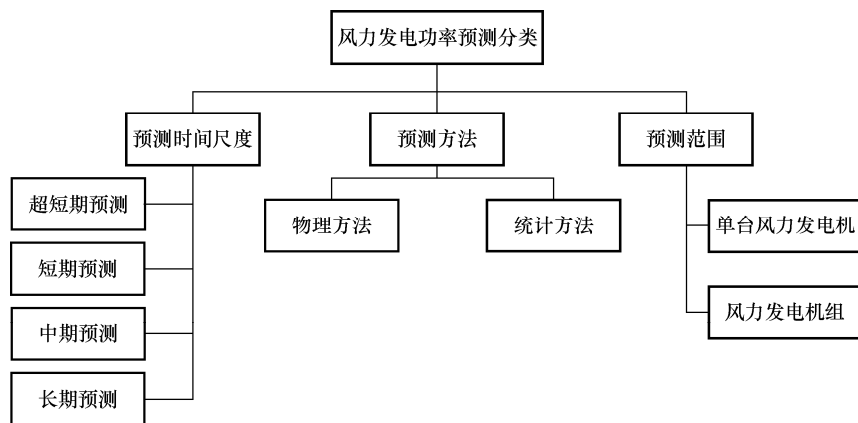


图 1.11 风力发电功率预测的分类

对应以上的分类，风力发电功率预测的主要方法表述如下。

按预测时间尺度划分的风力发电功率预测，如表 1.5 所示。

表 1.5 按预测时间尺度划分的风力发电功率预测

预测类型	时间尺度		用 途	常用方法
	分辨率	预测周期		
超短期	15min	0~4h	风力发电机的控制、预测恶劣天气	持续法
短期	15min	0~72h	电网的功率平衡、经济调度	基于数值天气预报（NWP）
中期	天	1 周	安排检修、调试	基于数值天气预报（NWP）
长期	年	数年	风力发电场规划	统计法

按预测方法划分的风力发电功率预测分类，如表 1.6 所示。

表 1.6 按预测方法划分的风力发电功率预测

预测方法	原 理	优 点	缺 点
物理方法	依据风力发电场周围地理信息建立相应的物理方程	只需要地理信息	计算量大
统计方法	根据大量的历史数据利用统计规律	计算速度快	输入量和输出量关系描述困难

按预测范围划分的风力发电功率预测，如表 1.7 所示。

表 1.7 按预测范围划分的风力发电功率预测

预测范围	原 理	优 点	缺 点
单台风力发电机	单独对每台风力发电机建模来预测整个风力发电场的功率	建模简单	数据量和计算量大
	通过几台典型风力发电机建模, 对功率加权来预测风力发电场功率	计算量小	需要考虑多方面的因素
风力发电机组	建立整个风力发电系统的模型来预测风力发电场功率	预测达到的准确度高	建立的模型构成不易实现

风能预测的用处较多。为进一步提高预测的准确度, 可结合人工智能等算法与传统的统计方法。

### 1.3.2 低电压穿越

低电压穿越 (Low Voltage Ride Through, LVRT) 技术, 主要是指由于各种原因, 电网出现事故, 这时电网电压通常较低, 风力发电场可保证在事故期间一直与电网相连, 帮助电力系统输出无功功率来维持运行。电网电压低于正常值时, 为使系统稳定, 风力发电机组一般应该脱网运行。装机容量较大的风力发电场, 此时对电网的危害甚至会导致系统瘫痪。欧洲的一些国家对风力发电行业的低压运行标准进行了规定。由于不同国家的电网结构差异较大, 风力发电在整个电力系统中的组成差别也较大。可见, 针对不同的规定, 存在不同的风力发电低电压运行标准, 如图 1.12 所示。例如, 丹麦的电网要求, 当电网电压跌落至额定电压的 25% 时, 若能够保持 100ms, 则要求风力并网维持运行; 而西班牙的规定是, 在故障期间, 双馈风力发电机可让断路器跳闸运行。

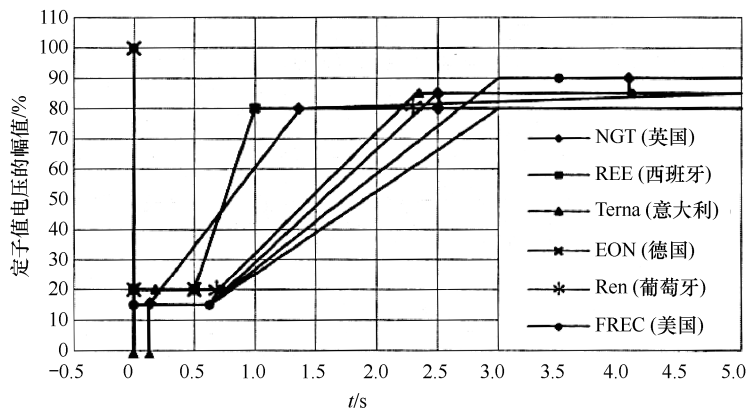


图 1.12 各国低电压穿越规定

众所周知, 德国风能利用的历史悠久, 德国提出的风力发电规则在风力发电行业具有一定的权威性和代表性, 其中 EON 公司规定的风力发电系统入网的具体参数如图 1.13 所示, 从图中可以看出, 当电网电压跌落至额定电压的 15% 且相应时间达到 300ms 时, 发电机应正常运转。

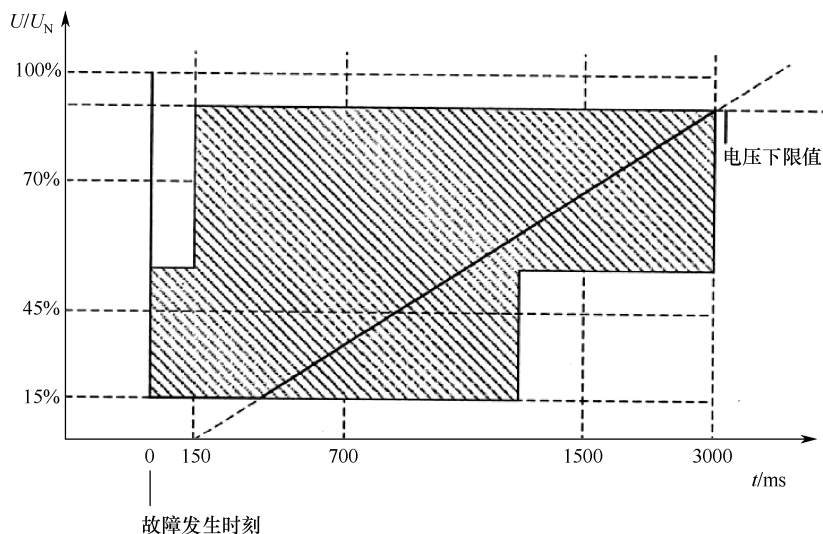


图 1.13 德国 EON 公司低电压穿越标准图

我国电力行业的相关规范规定，在电力系统的传输过程中系统出现事故后，当风力发电场 PCC（公共连接点）点的电压等于额定电压的 20% 时，风力发电机组维持 625ms。这样，就需要采取一定的措施：不增加任何硬件设备，只改变 PWM 变换器的设计；另外，增加撬棒电路储能。到目前为止，所采取的方法都未能很好地实现低电压穿越的目标，因此影响了大规模风力发电并网发展的前景。

### 1.3.3 风力发电场中的并网控制技术

风力发电技术的快速发展和电力电子技术元器件的更新换代，尤其是双馈异步发电机转子侧和网侧之间的背靠背双 PWM 变换器，使得现代风力发电控制技术不断发展。为了能够顺利实现风力发电机组的低电压穿越，首先要弄清楚在故障期间电网电压变动的暂态机理，其次要研究电网在不同程度电压跌落故障下，风力发电机组在各种状况下的运行特点，并据此找到相应的控制方法，提高风力发电机组的低电压穿越性能。当前，国内外低电压穿越控制技术的研究是风力发电场并网研究的热点，其主要方法有定子侧法、直流母线电容保护法和转子侧并联交流撬棒电路法三种。

定子侧法改变定子侧的参数。这种方法的基本原理如下：发电机与电网正常情况下可以相连，由于各种事故原因，如系统发生电压降落等，发电机通过开关的分断使发电机与电网分离，电网电压通常较低，此时由于继电保护动作，暂时的故障很快被清除，此后当电网电压逐步上升到正常值时，控制发电机并网的开关闭合，发电机接入系统。这种控制方式可以很好地限制故障期间发电机定子绕组磁链随时间的增加速度，避免电网电压降低情况的恶化。

直流母线电容保护法在直流母线侧增加电容，以便限制变换器的过流和母线的过压。这种方法一般通过直流撬棒电路中的限流电阻，使电网故障期间发电机的储能很好地释放，进而减小母线电压的波动。在低电压故障期间，风力发电机侧的电力电子变换器可能过流，为了防止这一问题损坏变换器，一般采用并联大功率机侧变换器的方法。



转子侧并联交流撬棒电路法在转子中加入一个交流撬棒电路，使之与转子并联，以保证系统不正常期间，发电和储能可通过撬棒电阻释放，进而保证风力发电系统完成低电压穿越。目前，这种方法由于具有结构简单、易于实现和效果良好的优点，在我国现代风力发电技术的发展中应用较多。

1.4 风力发电技术的发展趋势

在大力发展经济的同时，必须兼顾环境的保护，而能两者兼顾的措施之一就是着力拓展清洁无污染的风力发电规模。在国内外全面应用的风力发电技术，是目前最具开发潜力和有着广阔前景的再生能源技术之一；近年来，风力发电技术的开发和利用已受到了国内外学者的广泛关注。风力发电产业的技术不断发展，新技术不断涌现。当前，风力发电产业总体发展的趋势和特点如表 1.8 所示。

表 1.8 风力发电产业总体发展的趋势和特点

风力发电产业总体发展的趋势	特 点
单机容量不断增加	兆瓦级风力发电机出现并广泛应用，因此进一步缩小了风力发电场的占地面积
定桨距向变桨距变速控制迈进	风能的流动具有随机性和不确定性，只有不断调整风轮的桨距角，才能达到风能的最大捕获和利用。电网在各种故障情况下，也要适时改变叶轮桨距角来调整获取的风能，因此变桨距变速调节才能实现风力机组的优化控制
双馈和直驱并存	交流励磁变速恒频双馈风力发电机应用，依靠其优良的性能在风力发电市场中的份额逐年增加。相较而言，直驱风力发电机组由于具有全功率变流技术，比较适合并网时抵御低电压穿越故障。目前来看，直驱和交流励磁双馈发电机组还将继续并存
风力发电场与常规发电厂结合	能源短缺和环境的不断恶化，让人们意识到风能利用的迫切性。如何实现风力发电场、常规电厂和电网协调统一发展，最终达到完美结合，还有许多亟待解决的难题
陆上发电向海上发电发展	风力发电场规模的不断扩大，不同程度上限制了其在陆地上的发展。同时，海上风力资源相对丰富，海上风力发电技术将成为风力发电技术发展的重要方向

1.5 风力发电机的仿真技术

风力发电技术发展到今天，出现了很多问题。为解决这些风力发电技术的难题，可采用各种仿真技术，因为仿真技术是一种非常有效的技术手段。仿真技术在风力发电技术中的应用主要涉及风力发电关键设备如发电机的设计与制造，控制系统的优化设计，风力发电机组或风力发电场运行分析等方面。风力发电领域的主要仿真及特点体现在以下几方面，如表 1.9 所示。

表 1.9 风力发电领域的主要仿真及特点

风力发电领域的主要仿真	特 点
风能特性仿真	基于风能随时间不断变化的特性来进行仿真，仿真结果可用于风力发电机组或风力发电场的仿真分析中，是研究风能的最基本的仿真
风力发电机组部件的仿真设计	主要利用计算机辅助工程（CAE）来优化设计风力发电系统各部分结构部件

(续表)

风力发电仿真应用领域	特 点
风力发电机组仿真	通过这类仿真可以得到风力发电系统输出电能的变化规律，为进一步研究和控制风力发电机组的特性参数（如有功功率、无功功率和电压等参数）提供可靠的依据
控制系统仿真	建立风力发电系统控制整体仿真模型后，可以修改仿真模型中的某些参数，从而得到最佳的控制效果
风力发电场仿真	对于待建的风力发电场或已经建成的风力发电机组，组建风力发电场的整体控制模型，进行统一的仿真优化设计

MATLAB/Simulink、GH Bladed、PSCAD 和 Ansoft 等软件在风力发电系统仿真方面应用较为广泛，其中 MATLAB/Simulink 和 Ansoft 各有侧重。在 MATLAB 仿真环境下，风力机各组件通过编程或 Simulink 模块库搭建模型来实现仿真；Ansoft 软件偏重于风力发电机的电磁结构设计。在 Ansoft 软件中，风力发电机各部分的结构，可通过在打开的工具图标界面中设置参数来完成设计和仿真优化。本书后续章节的内容主要围绕 MATLAB/Simulink 和 Ansoft 这两款软件来研究风力发电技术，并对其进行仿真分析。

## 第2章 风力发电系统的 MATLAB 仿真基础

美国 MathWorks 公司于 20 世纪 80 年代推出的 MATLAB (Matrix Laboratory) 软件, 是一款功能相对较全的模拟仿真综合类软件, 也是一种多行业建模的大型软件, 具有用户界面友好和开放性强的突出特点。它能完美结合矩阵运算、数值分析、图形处理、图形用户界面和编程技术, 是科研人员和工程人员分析工程问题、进行相应计算及编写程序的常用软件之一。目前, MATLAB 已被许多学科使用, 成为一款适用于多学科、多平台和功能强大的仿真软件。MATLAB 的强大实用性, 已使得其成为全球高校所有工程专业的必修课程之一, 大多数高等院校和科研院所也将 MATLAB 用作主要的科研工具。

### 2.1 MATLAB 工作窗口

风力发电领域中的许多问题都需要借助 MATLAB 来解决。为熟练使用 MATLAB, 下面介绍其常用的窗口和指令。

单击已安装 MATLAB 软件的快捷图标, 很容易生成一个新的 MATLAB 窗口。主要操作区域位于界面上的不同部位, 包括菜单栏、工具栏、当前目录窗口、工作空间窗口、历史命令窗口和命令窗口等, 如图 2.1 所示。



图 2.1 MATLAB 的工作窗口

#### 2.1.1 MATLAB 的窗口及其说明

MATLAB 的窗口及其说明如表 2.1 所示。

表 2.1 MATLAB 的窗口及其说明

窗 口	说 明
命令窗口 (Command Window)	MATLAB 执行命令和相应运算的对话窗口，不断闪烁的“>>”表明其后可供用户输入指令，按 Enter 键，指令就开始运行
工作空间窗口 (Workspace)	软件中的所有变量名、值、尺寸、字节数等
历史命令窗口 (Command History)	显示曾经执行过的命令语句
当前目录窗口 (Current Directory)	通过鼠标操作能够看到相应类型的程序和数据文件
发行说明窗口 (Lanch Pad)	软件公司产品的信息和组件说明

## 2.1.2 MATLAB 菜单项的功能说明

MATLAB 菜单项及其使用说明如表 2.2 所示。

表 2.2 MATLAB 菜单项及其使用说明

菜 单	选 项	说 明
File (文件)	New (新建)	创建一个文件
	Open (打开)	打开原来创建的文件
	Close command window (关闭命令窗口)	关闭命令界面
	Import data (导入数据)	把数据导入到工作空间
	Save workspace (保存工作空间)	保存工作空间的数据
	Set path (设置路径)	设置搜索所有文件的路径
	Preferences (参数)	打开参数输入对话框并设置
	Print (打印)	打印文件
	Exit MATLAB (退出 MATLAB)	退出 MATLAB
Edit (编辑)	Undo (撤销)	撤销已进行的相关操作
	Redo (重做)	恢复已删除的相关操作
	Cut (前切)	剪切相应内容
	Copy (复制)	复制相应内容
	Paste (粘贴)	粘贴相应内容
	Paste special (选择性粘贴)	选择性粘贴相应内容
	Delete (删除)	删除相应内容
	Select all (全选)	全部选择
	Clear command history (清除历史命令)	清除历史命令
	Clear command window (清除命令窗口)	清除命令窗口
	Clear workspace (清除工作空间)	清除工作空间
View (视图)	Desktop layout (桌面布局)	MATLAB 系统的桌面数据呈现类型
Web (网络)		链接 MathWorks 公司的网址
Window (窗口)		查看已打开的窗口，并在窗口间切换
Help (帮助)		打开帮助界面

## 2.2 MATLAB 运行常识

### 1. 参与运算的量

(1) 常量: MATLAB 运行环境中的常量, 与其他常见软件中的常量相同, 如 13、-3、0 是整数型常量, 3.1 和 -0.21 是实数型常量。

(2) 变量: MATLAB 运行环境中的各种变量是软件运算处理的重要参数。为方便起见, 变量的命名规则规定第一个字母使用英文字母, 且只能由英文大小写字母、数字 1, 2, 3, ... 和符号 “\_” 三者组合而成。

表 2.3 给出了 MATLAB 中的一些常见变量及其说明。

表 2.3 MATLAB 中的常见变量及其说明

变 量	说 明
pi	3.1415926
eps	浮点计算精度
Inf 或 inf	正无穷大
NaN 或 nan	未定值
realmax	最大的实正数
realmin	最小的实正数
i 或 j	虚数因子, 即 $\sqrt{-1}$
ans	计算结果的默认变量名

(3) 矩阵: MATLAB 软件中的矩阵运算非常方便。众所周知, 任何工程实际问题转化为矩阵来求解时, 都会非常简捷。矩阵和数组都能在软件中进行计算。矩阵运算功能是 MATLAB 软件中计算和分析问题的关键。

(4) 向量: 在 MATLAB 的仿真运算中, 向量是一种只包含一行或一列的特殊矩阵。

### 2. 算术运算

MATLAB 中算术运算的常用符号及其说明如表 2.4 所示<sup>[11~18]</sup>。

表 2.4 MATLAB 算术运算的常用符号及其说明

运算符	说 明	运算符	说 明
+	加	\	左乘 (数或矩阵)
-	减	.\	左除 (数组)
*	乘 (数或矩阵)	/	右除 (数或矩阵)
.*	乘 (数组)	./	右除 (数组)
^	乘方 (数或矩阵)	'	转置 (数或矩阵)
.^	乘方 (数组)	.'	转置 (数组)

### 3. 关系运算

MATLAB 中的关系运算符、说明及函数名如表 2.5 所示。

表 2.5 MATLAB 中的关系运算符、说明及函数名

运算符	说 明	函数名
==	等于	eq
~=	不等于	ne
<	小于	lt
>	大于	gt
<=	小于等于	le
>=	大于等于	ge

关于以上运算符的说明如下：

- (1) 参与运算的两个变量应是同维矩阵，但矩阵和标量也可进行运算。
- (2) 如果参与运算的是两个矩阵，那么把两个矩阵的对应元素进行比较，相应的逻辑成立时输出“1”，反之输出“0”。
- (3) 参与运算的是矩阵和标量时，矩阵中的每个元素与标量进行逻辑比较，值为“1”或“0”。

#### 4. 逻辑运算

MATLAB 中的逻辑运算符、说明及函数名如表 2.6 所示。

表 2.6 MATLAB 中的逻辑运算符、说明及函数名

运算符	说 明	函数名
&	逻辑与	and
	逻辑或	or
~	逻辑非	not

计算机中的常见逻辑运算遵守如下约定：

- (1) 运算的对象是维数相等的矩阵，或是矩阵和标量。
- (2) 运算的对象是两个矩阵时，矩阵中位置相同的元素进行逻辑运算得到结果。
- (3) 矩阵和标量进行运算时，矩阵中的每个元素与标量进行逻辑运算得到结果。

#### 5. MATLAB 中的常用数学函数

表 2.7 给出了 MATLAB 中的常用数学函数及其含义。

表 2.7 MATLAB 中的常用数学函数及其含义

运算符	含 义	运算符	含 义
sin	求正弦	real	取向量实部
cos	求余弦	imag	取向量虚部
tan	求正切	conj	取共轭复变量
asin	求反正弦	min	求向量最小元素
acos	求反余弦	max	求向量最大元素
atan	求反正切	length	计算向量长度
sinc	求 sinc	size	求矩阵的维度
exp	求指数	zeros	生成零矩阵
log	求自然对数	ones	生成单位阵

(续表)

运算符	含 义	运算符	含 义
log2	求以 2 为底的对数	sqrt	取变量的平方根
log10	求以 10 为底的对数	abs	变量取绝对值或取向量的大小
pow2	求基数 2 的 $n$ 次幂	angle	计算向量相角

## 2.3 MATLAB 程序的基本说明

在 MATLAB 编程语言中，用来控制流程的语句有三种，即顺序结构语句、循环结构语句和分支结构语句。

### 1. 顺序结构

在顺序结构语句中，MATLAB 表达式在程序文件中的位置反映了程序执行的顺序。

### 2. 循环结构

#### (1) for 命令

for 表示循环，其后的语句可执行若干次。语法规则如下：

```
for 被控参数 = <循环执行的次数>
    循环语句的功能
end
```

#### (2) while 命令

while 命令和 for 命令不同。执行 while 命令要符合一定的条件，即执行前先要确定循环要求是否成立；而 for 命令主要通过比较执行次数和设定值的大小，来决定是否继续执行循环体中的语句。语法规则如下：

```
while <条件>
    循环体
end
```

条件表达式的逻辑值为“真”时，执行循环体内容；反之则不执行。

### 3. 分支结构

#### if-else-end 分支命令

if-else-end 分支命令用来决定是否执行语句。语法规则如下：

```
if <条件语句是否成立>
    若为"真"则执行
else
    反之
end
```

## 2.4 MATLAB 常用命令与函数

表 2.8 给出了 MATLAB 中的一些常用命令与函数。

表 2.8 MATLAB 中的一些常用命令与函数

	命令/函数	说 明		命令/函数	说 明
管理命令和函数	help	在线帮助文件	文件和系统命令	cd	改变当前工作目录
	doc	装入超文本说明		dir	目录列表
	what	M、MAT、MEX 文件的目录列表		delete	删除文件
	type	列出 M 文件		getenv	获取环境变量值
	lookfor	通过 help 条目搜索关键字		!	执行 DOS 系统命令
	which	定位函数和文件		unix	执行 UNIX 系统命令并返回结果
	demo	运行演示程序		diary	保存 MATLAB 任务
	path	控制 MATLAB 搜索路径		cedit	设置命令行编辑
管理变量和工作空间	who	列出当前变量	控制命令窗口	clc	清除命令窗口
	whos	列出当前变量（长表）		home	光标置左上角
	load	从磁盘文件中恢复变量		format	设置输出格式
	save	保存工作空间变量		Echo	底稿文件内使用回显
	clear	从内存中清除变量和函数		more	在命令窗口中控制分页输出
	pack	整理工作空间内存	启动和退出	quit	退出 MATLAB
	size	矩阵的大小		startup	引用 MATLAB 时所执行的*.m 文件
	length	向量的长度		matlabrc	主启动*.m 文件
	disp	显示矩阵			

## 2.5 MATLAB 基本操作

MATLAB 仿真可以生成很多图形曲线，最常见的是二维图形和三维图形。MATLAB 能够绘制曲线图、条形图、散点图、流线和三维向量图等。表 2.9 列出了 MATLAB 中的常用绘图命令或函数及其作用。

表 2.9 MATLAB 中的常用绘图命令或函数及其作用

命令/函数	说 明	命令/函数	说 明
fill	填充二维多边形	polar	绘制极坐标图形
loglog	绘制全对数二维坐标	semilogx	绘制 x 轴半对数坐标图形
plot	绘制线性坐标图形	semilogy	绘制 y 轴半对数坐标图形
fill3	填充三维多边形	plot3	绘制三维线或点形图
mesh	绘制三维网格图形	surf	绘制三维表面图
axis	设置坐标轴标度	hold	设置当前图形保护模式
axes	设置坐标轴位置	subplot	将图形窗口分为几个区域
box	坐标轴盒状显示	zoom	缩放二维图形
grid	坐标轴网格线开关设置	colorbar	设置颜色条
gtext	在鼠标位置加文字说明	xlabel	给图形的 x 轴加文字说明
text	在图形上加文字说明	ylabel	给图形的 y 轴加文字说明
title	在图形上加标题	zlabel	给图形的 z 轴加文字说明



## 2.6 Simulink 简介

### 2.6.1 Simulink 概述

Simulink 是一款功能强大的系统建模、运算和研究工具，MATLAB 环境下的 Simulink 模块可生成图形化输出曲线，同时可与其他系统对接，为复杂系统混合建模，为单个子系统生成模块，并将生成的模块放到系统模块库中供以后调用。

通常使用计算机来模拟研究对象。模拟所基于的是物理对象或物理模型，即模拟是物理模拟。建立仿真模型的大致过程如下：利用数学方程抽象出系统模型，选择运算规则，编写或输入相应的模块，使用计算机系统对模型自动进行计算，此后按照运算结果调整并完善数学模型。

图 2.2 所示为 Simulink 的简单仿真界面，界面中输出的是变频余弦函数。

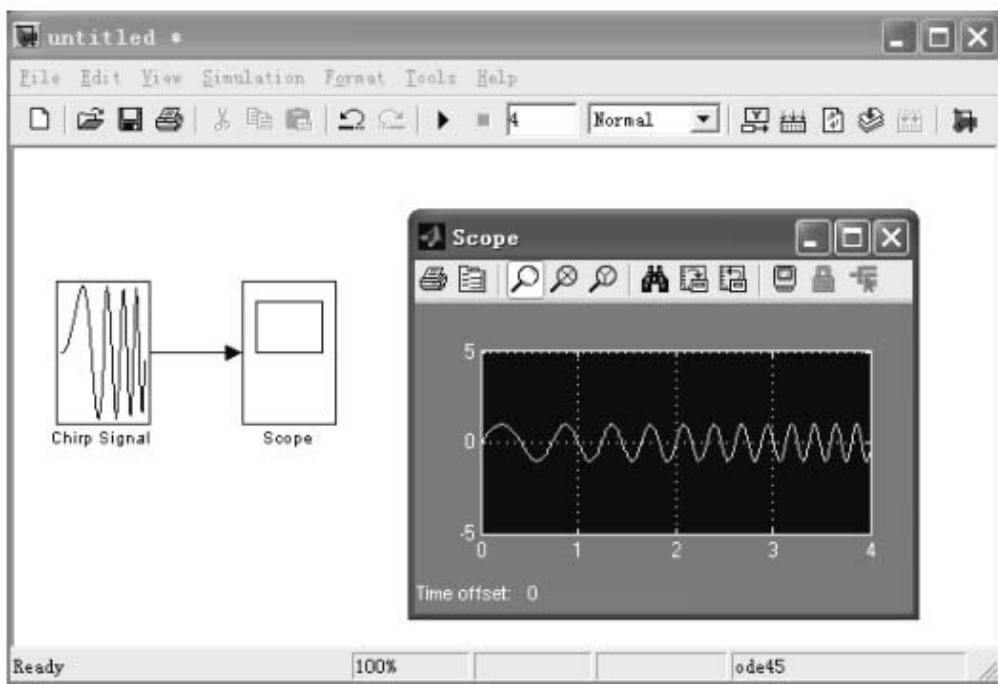



图 2.2 Simulink 的简单仿真界面

现代系统都比较复杂，Simulink 可将复杂系统简单地抽象为可控的数学模型，进而建立更真实的系统模型。例如，可以建立区域电网模型来模拟奥运会会场的供电和突发故障情况，可以建立模拟瘟疫病毒生长规律的模型，可以建立模拟载人航天飞船舱体设计的模型等。

### 2.6.2 Simulink 的简单操作

#### 1. Simulink 的运行

要运行 Simulink，可在 MATLAB 的命令窗口中输入 Simulink 命令，或单击主界面上的 .

图标。此时，界面直接进入 Simulink Library Browser (Simulink 库浏览器)，如图 2.3 所示，浏览器左下方窗格中的树形图即为 Simulink 模块组，用户可在其中找到自己所需的模块组。

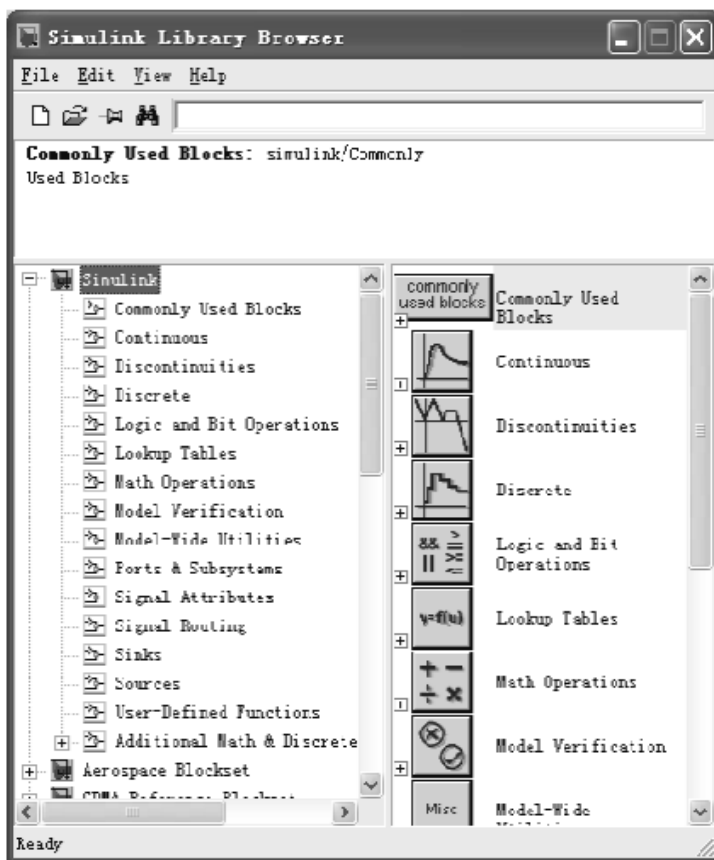


图 2.3 Simulink Library Browser

## 2. Simulink 的菜单

Simulink 菜单项的名称及功能如表 2.10 所示。

表 2.10 Simulink 菜单项的名称及功能

菜单名	菜单项	功 能
File (文件)	New→Model	新建模型
	Model properties	模型属性
	Preferences	Simulink 界面的默认设置选项
	Print...	打印模型
	Close	关闭当前 Simulink 窗口
	Exit MATLAB	退出 MATLAB 系统
Edit (编辑)	Create subsystem	创建子系统
	Mask subsystem...	封装子系统
	Look under mask	查看封装子系统的内部结构
	Update diagram	更新模型框图的外观

(续表)

菜单名	菜单项	功 能
View (视图)	Go to parent	显示当前系统的父系统
	Model browser options	模型浏览器设置
	Block data tips options	光标位于模块上方时显示模块内部数据
	Library browser	显示库浏览器
	Fit system to view	自动选择最合适的显示比例
	Normal	以正常比例 (100%) 显示模型
Simulation (仿真)	Start/Stop	启动/停止仿真
	Pause/Continue	暂停/继续仿真
	Simulation Parameters ...	设置仿真参数
	Normal	普通 Simulink 模型
	Accelerator	产生加速 Simulink 模型
Format (格式)	Text alignment	标注文字对齐工具
	Flip name	反转模块名
	Show/Hide name	显示/隐藏模块名
	Flip block	翻转模块
	Rotate block	旋转模块
	Library link display	显示库链接
	Show/Hide drop shadow	显示/隐藏阴影效果
	Sample time colors	设置不同采样时间序列的颜色
	Wide nonsalar lines	粗线表示多信号构成的向量信号线
	Signal dimensions	注明向量信号线的信号数
	Port data types	标明端口数据的类型
	Storage class	显示存储类型
Tools (工具)	Data explorer...	数据浏览器
	Simulink debugger...	Simulink 调试器
	Data class designer	用户定义数据类型
	Linear Analysis	线性分析工具

### 3. Simulink 模型库中的模块<sup>[21]</sup>

Simulink 模型库中含有描述系统特性的许多典型库, 主要包括连续系统 (Continuous)、非连续系统 (Discontinuities)、离散系统 (Discrete)、逻辑和位操作 (Logic and Bit Operations)、查找表 (Lookup Tables)、数学运算 (Math Operations)、模型验证 (Model Verification)、模型扩充 (Model-Wide Utilities)、端口和子系统 (Ports & Subsystems)、信号属性 (Signal Attributes)、信号路由 (Signal Routing)、接收 (Sinks)、信号源 (Sources)、用户自定义函数 (User-Defined Functions) 等; 另外, Simulink 模型库中还包含许多专用的学科仿真工具箱。

(1) 连续系统 (Continuous) 模块库的说明如表 2.11 所示。

表 2.11 连续系统模块库的说明

名 称	说 明	名 称	说 明
Derivative	积分运算模块	Transport Delay	信号输入根据规定时间来延时
Integrator	微分运算模块	Variable Transport Delay	信号输入根据可变时长来延时
State-Space	状态空间方程	Zero-Pole	零-极点函数
Transfer Fcn	传递函数		

(2) 非连续系统 (Discontinuities) 模块库的说明如表 2.12 所示。

表 2.12 非连续系统模块库的说明

名 称	说 明	名 称	说 明
Backlash	间隙函数	Rate Limiter	静态限制信号的变化速率函数
Coulomb & Viscous Friction	库伦和黏度摩擦函数	Rate Limiter Dynamic	动态限制信号的变化速率函数
Dead Zone	死区函数	Relay	滞环函数比较器
Dead Zone Dynamic	动态死区函数	Saturation	饱和函数输出
Hit Crossing	冲激函数	Saturation Dynamic	动态饱和和输出函数
Quantizer	量化函数	Wrap To Zero	零函数

(3) 离散系统 (Discrete) 模块库的说明如表 2.13 所示。

表 2.13 离散系统模块库的说明

名 称	说 明	名 称	说 明
Difference	差分环节	Memory	输出基本模块上一步的输入值
Discrete Derivative	离散微分环节	Tapped Delay	延迟
Discrete Filter	离散滤波器	Transfer Fcn First Order	离散一阶传递函数
Discrete State-Space	离散状态空间系统模型	Transfer Fcn Lead or Lag	传递函数
Discrete Transfer Fcn	离散传递函数模型	Transfer Fcn Real Zero	离散零点传递函数
Discrete Zero-Pole	以零-极点表示的离散传递函数模型	Unit Delay	一个采样周期的延迟
Discrete-time Integrator	离散时间积分器	Weighted Moving Average	权值移动平均模型
First-Order-Hold	一阶保持器	Zero-Order Hold	零阶保持器
Inter Delay	正数被延迟		

(4) 逻辑和位操作 (Logic and Bit Operations) 模块库的说明如表 2.14 所示。

表 2.14 逻辑和位操作模块库的说明

名 称	说 明	名 称	说 明
Bit Clear	位清零	Detect Change	检测跳变
Bit Set	置位	Detect Decrease	检测递减
Bitwise Operator	逐位操作	Detect Fall Negative	检测负下降沿
Combinatorial Logic	组合逻辑	Detect Fall Nonpositive	检测非负下降沿
Compare To Constant	和常量比较	Detect Increase	检测递增
Compare To Zero	和零比较	Detect Rise Nonnegative	检测非负上升沿

(续表)

名 称	说 明	名 称	说 明
Detect Rise Positive	检测正上升沿	Logic Operator	逻辑操作符
Extract Bits	提取位	Relational Operator	关系操作符
Interval Test	检测开区间	Shift Arithmetic	移位运算
Interval Test Dynamic	动态检测开区间		

(5) 查找表 (Lookup Tables) 模块的说明如表 2.15 所示。

表 2.15 查找表模块库的说明

名 称	说 明
Cosine	余弦函数查找表
Direct Lookup Table (n-D)	$n$ 个输入信号的查找表 (直接匹配)
Interpolation (n-D) using PreLookup	$n$ 个输入信号的预插值
Lookup Table	输入信号的查找表 (线性峰值匹配)
Lookup Table (2-D)	二维输入信号的查找表 (线性峰值匹配)
Lookup Table (n-D)	$n$ 维输入信号的查找表 (线性峰值匹配)
Lookup Table Dynamic	动态查找表
PreLookup Index Search	预查找索引搜索
Sine	正弦函数查找表

(6) 数学运算 (Math Operations) 模块库的说明如表 2.16 所示。

表 2.16 数学运算模块库的说明

名 称	说 明	名 称	说 明
Abs	取绝对值	Polynomial	多项式
Add	加法	Product	乘运算
Algebraic Constraint	代数约束	Product of Elements	元素乘运算
Assignment	赋值	Real-Imag to Complex	由实部和虚部输入合成复数输出
Bias	偏移	Reshape	取整
Complex to Magnitude-Angle	由复数输入转为幅值和相角输出	Rounding Function	舍入函数
Complex to Real-Imag	由复数输入转为实部和虚部输出	Sign	符号函数
Divide	除法	Sine Wave Function	正弦波函数
Dot Product	点乘运算	Slider Gain	滑动增益
Gain	比例运算	Subtract	减法
Magnitude-Angle to Complex	由幅值和相角输入合成复数输出	Sum	求和运算
Math Function	包括指数函数、对数函数、求平方、开根号等常用数学函数	Sum of Elements	元素和运算
Matrix Concatenation	矩阵级联	Trigonometric Function	三角函数
Min Max	最值运算	Unary Minus	一元减法
Min Max Running Resettable	最大最小值运算	Weighted Sample Time Math	权值采样时间运算

(7) 模型验证 (Model Verification) 模块库的说明如表 2.17 所示。

表 2.17 模型验证模块库的说明

名 称	说 明	名 称	说 明
Assertion	确定操作	Check Input Resolution	检查输入精度
Check Discrete Gradient	检查离散梯度	Check Static Gap	检查静态偏差
Check Dynamic Gap	检查动态偏差	Check Static Lower Bound	检查静态下限
Check Dynamic Lower Bound	检查动态下限	Check Static Range	检查静态范围
Check Dynamic Range	检查动态范围	Check Static Upper Bound	检查静态上限
Check Dynamic Upper Bound	检查动态上限		

(8) 模型扩充 (Model-Wide Utilities) 模块库的说明如表 2.18 所示。

表 2.18 模型扩充模块库的说明

名 称	说 明	名 称	说 明
Block Support Table	功能块支持表	Timed-Based Linearization	时间线性分析
DocBlock	文档模块	Trigger-Based Linearization	触发线性分析
Model Info	模型信息		

(9) 端口和子系统 (Ports & Subsystems) 模块库的说明如表 2.19 所示。

表 2.19 端口和子系统模块库的说明

名 称	说 明	名 称	说 明
Configurable Subsystem	结构子系统	In1	输入端口
Atomic Subsystem	单元子系统	Model	模型
Code Reuse Subsystem	代码重用子系统	Out1	输出端口
Enable	使能	Subsystem	子系统
Enable and Triggered Subsystem	使能和触发子系统	Subsystem Examples	子系统例子
Enable Subsystem	使能子系统	Switch Case	转换事件
For Iterator Subsystem	重复操作子系统	Switch Case Action Subsystem	转换事件动作子系统
Function-Call Generator	函数调用生成器	Trigger	触发操作
Function-Call Subsystem	函数调用子系统	Trigger Subsystem	触发子系统
If	假设操作	While Iterator Subsystem	重复子系统
If Action Subsystem	假设动作子系统		

(10) 信号属性 (Signal Attributes) 模块库的说明如表 2.20 所示<sup>[21]</sup>。

表 2.20 信号属性模块库的说明

名 称	说 明	名 称	说 明
Data Type Conversion	数据类型转换	Probe	探针点
Data Type Conversion Inherited	继承的数据类型转换	Rate Transition	比率转换
Data Type Duplicate	数据类型复制	Signal Conversion	信号转换
Data Type Propagation	数据类型继承	Signal Specification	信号特征说明
Data Type Propagation Examples	数据类型继承例子	Weighted Sample Time	权值采样时间
Data Type Scaling Strip	数据类型缩放	Width	信号宽度
IC	信号输入属性		

(11) 信号路由 (Signal Routing) 模块库的说明如表 2.21 所示。

表 2.21 信号路由模块库的说明

名 称	说 明	名 称	说 明
Bus Assignment	总线分配	Goto	信号去向
Bus Creator	总线生成	Goto Tag Visibility	标签可视化
Bus Selector	总线选择	Index Vector	索引向量
Data Store Memory	数据存储	Manual Switch	手动选择开关
Data Store Read	数据存储读取	Merge	信号合并
Data Store Write	数据存储写入	Multiport Switch	多端口开关
Demux	将一个复合输入转化为多个单一输出	Mux	将多个单一输入转化为一个复合输出
Environment Controller	环境控制器	Selector	信号选择
From	信号来源	Switch	开关选择

(12) 接收 (Sinks) 模块库的说明如表 2.22 所示。

表 2.22 接收模块库的说明

名 称	说 明	名 称	说 明
Display	数字显示器	Terminator	连接到没有连接到的输出端
Floating Scope	浮动观察口	To File (.mat)	将输出数据写入数据文件保护
Out1	输出端口	To Workspace	将输出数据写入 MATLAB 工作空间
Scope	示波器	XY Graph	显示二维图形
Stop Simulation	停止仿真		

(13) 信号源 (Sources) 模块库的说明如表 2.23 所示。

表 2.23 信号源模块库的说明

名 称	说 明	名 称	说 明
Band-Limited White Noise	带限白噪声	Pulse Generator	脉冲发生器
Chirp Signal	形成频率增加正弦波	Ramp	斜坡输入
Clock	显示和设定仿真起始和结束时刻	Random Number	正弦随机数
Constant	常数信号	Repeating Sequence	变化规律相同的信号
Counter Free-Running	无限计数器	Repeating Sequence Interpolated	重复序列内插值
Counter Limited	有限计数器	Repeating Sequence Stair	重复排队系列
Digital Clock	在规定的采样间隔产生仿真时间	Signal Builder	信号建立器
From File (.mat)	来自数据文件	Signal Generator	信号发生器
From Work Space	来自 MATLAB 的工作空间	Sine Wave	正弦波
Ground	连接到没有连接到的输入端	Step	阶跃波
In1	输入信号	Uniform Random Number	一致随机数

(14) 用户自定义函数 (User-Defined Functions) 模块库的说明如表 2.24 所示。

表 2.24 用户自定义函数模块库的说明

名 称	说 明	名 称	说 明
Embedded MATLAB Function	嵌入的 MATLAB 函数	S-Function	调用自编的 S 指令程序计算
Fcn	用自定义函数（表达式）进行运算	S-Function Builder	S 函数建立器
M-file S-Function	M 文件编写的 S 指令	S-Function Examples	S 函数例子
MATLAB Fcn	调用 MATLAB 常用函数计算		

### 2.6.3 MATLAB 电力系统模块库的使用

MATLAB 仿真软件中带有许多学科的应用模块，因此可方便各学科的建模和仿真。Simulink 中的电力系统模块库（SimPowerSystems）是风电系统中常用的模块之一，该模块库中的常见模块如图 2.4 所示。

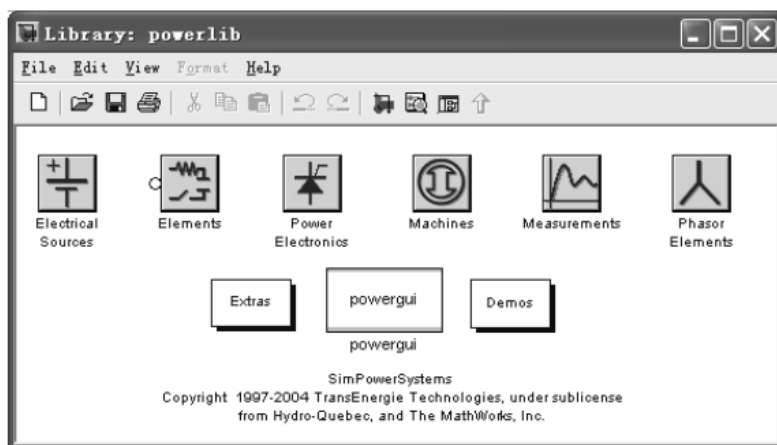


图 2.4 电力系统模块库

#### 1. 电源模块库（Electrical Sources）中的元件

这个模块库中有电路和电网系统建模与仿真所需的多种理想电流源及电压源，尤其是可编程电源。具体包括输出稳定直流电压的直流电压源（DC Voltage Source）、输出稳定交流电压的交流电压源（AC Voltage Source）、提供稳定交流电流的交流电流源（AC Current Source）、输出电压受其他元件参数控制的受控电压源（Controlled Voltage Source）和受控电流源（Controlled Current Source），还包括常见的对称交流三相电源（Three-Phase Source）。

#### 2. 电器元件库（Elements）中的元件

这个模块库由电器元件库中的多种形式的线性和非线性部件组成，具体包括串联和并联支路元件（Elements）、输电和配电网络中的线路元件（Lines）、高低压断路器元件（Circuit Breakers）和多种功能的变压器元件（Transformers）。

#### 3. 电机模块库（Machines）中的元件

这个模块库中含有的电机类型较多，具体包括：各种结构形式的同步电机（Synchronous Machine，可分为普通电励磁同步电机和永磁同步电机两类）、异步电机（Asynchronous



Machine, 可分为普通异步电机和交流励磁异步电机两类) 和直流电机 (DC Machine)。

#### 4. 电力电子模块库 (Power Electronics) 中的元件

这个模块库中含有多多种电力电子器件及其组合而成的电路, 大致分为普通电力二极管 (Diode)、常用电力变换用晶闸管 (Thyristor)、电力系统通断用的理想开关 (Ideal Switch), 以及较为重要的电力电子场效应管 (MosFet)。

#### 5. 测量模块库 (Measurements) 中的元件

这个模块库中含有能对各种信号进行测量和输出的模块。为实现可视化功能, 上述模块通常和显示模块联合应用, 具体包括电流测量模块 (Current Measurement)、电压测量模块 (Voltage Measurement)、阻抗测量模块 (Impedance Measurement)、万用表 (Multimeter) 和三相电流电压测量模块 (Three-Phase V-I Measurement)。

### 2.6.4 Simulink 的简单操作

首先在 MATLAB 软件中打开 Simulink 窗口, 然后选择 Simulation→Configuration Parameters, 此时会弹出可以具体选择参数的界面, 仿真参数设置界面如图 2.5 所示。

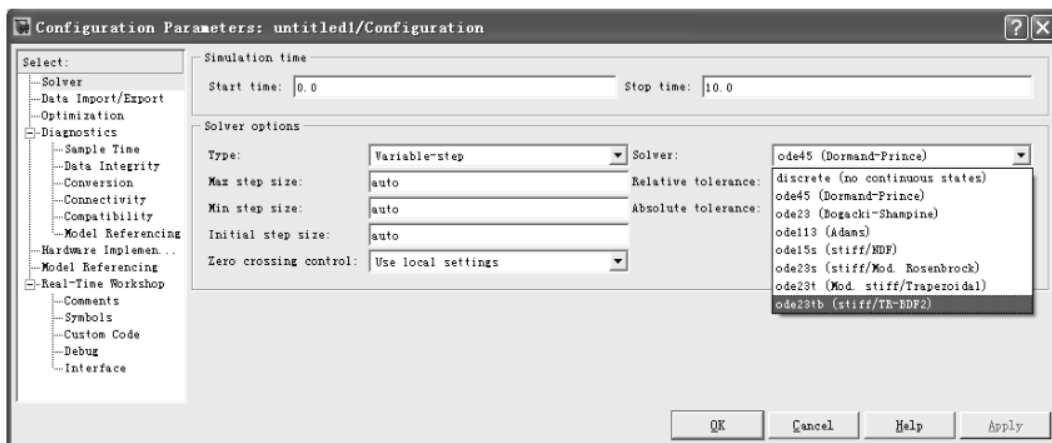


图 2.5 仿真参数设置界面

左侧窗格中各项的说明如下。

#### 1. Solver (求解器)

Solver 的主要作用是设置求解时间和精度, 具体设置参数包括仿真的开始和结束时刻、所用的求解器类型、解的精度等。

#### 2. Data Import/Export (数据导入/导出)

该项的作用是, 在 Simulink 和 MATLAB 的工作空间中传递或交换数据, 以方便完成用户设定的程序。数据导入/导出参数设置界面如图 2.6 所示。

#### 3. Diagnostics (诊断)

该项的主要作用是解决偶然出现的一些事件。仿真异常诊断设置界面如图 2.7 所示。

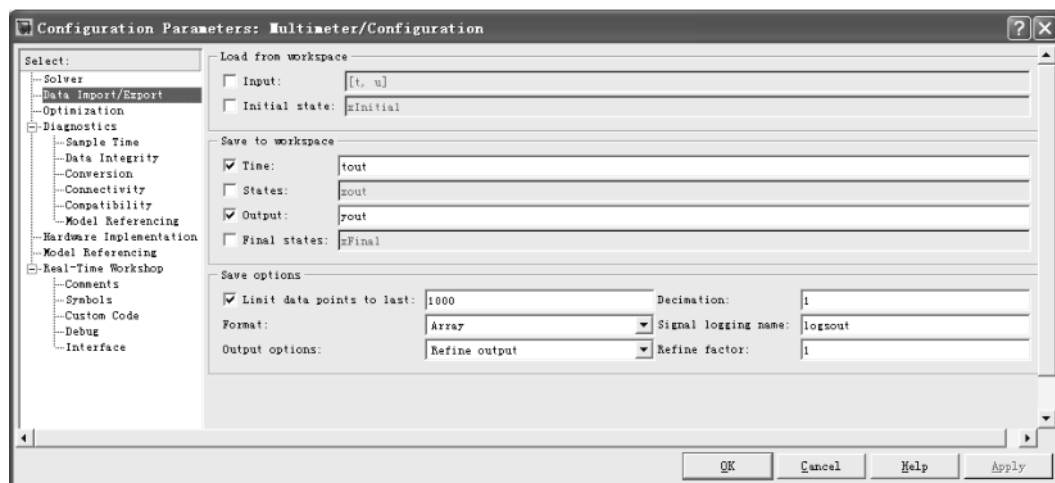


图 2.6 数据导入/导出参数设置界面

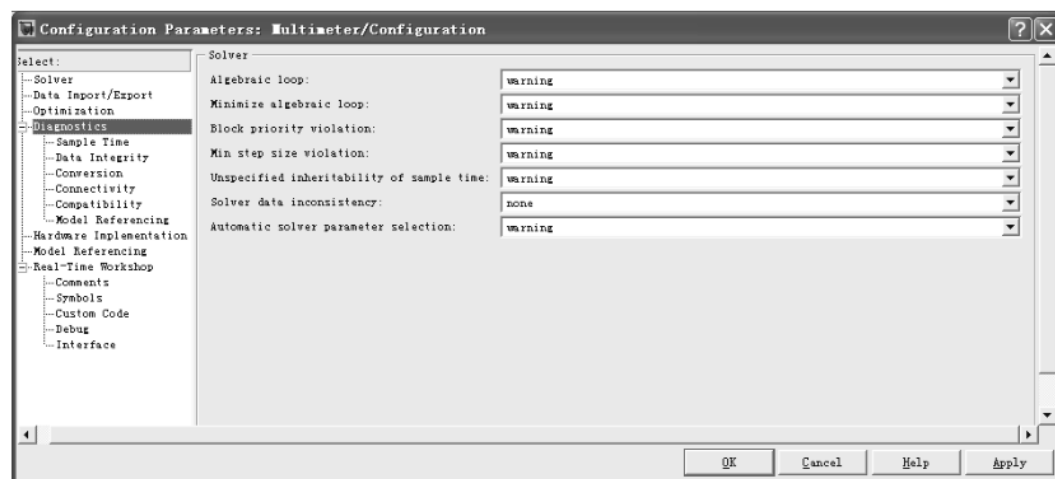



图 2.7 仿真异常诊断设置界面

单击工具栏上的图标  运行仿真程序，仿真结束后可通过输出窗口显示运行结果曲线。

## 2.7 MATLAB 仿真软件在风力发电系统分析中的应用

风力发电系统并入电网时，其控制与电力系统的运行密切相关。电网一般具有发电厂的发电环节、高压远距离的输电环节、到达用户之前的变电和配电环节，以及负荷消耗电能的环节等。因此，想要深入分析电力系统中的整体工作状况，如果没有一个方便的仿真平台，那么建模工作会相当复杂。MATLAB 仿真软件中集成 Simulink 工具箱后，大大缩短了研究任何复杂系统建模与分析的时间。风力发电系统中关键部件的设计和运行，在论证系统的可行性时，必须采取一定的仿真手段来验证方案的可行性。在实际运行的电力系统中，也可采用仿真工具来优化系统参数和元件的配置，进而验证硬件电路的整体功能是否满足基本要求。下面重点介绍 MATLAB 仿真软件的 Simulink 工具箱中的电力系统模块的使

用，主要说明常用电力整流电路的建模与仿真分析，并举例说明电力系统输电线路自动重合闸的建模与仿真方法。

### 2.7.1 单相桥式整流电路的 Simulink 建模

众所周知，交流整流电路在电力系统中应用较广，其中常见的相位控制作用就是通过改变控制角的大小来达到调节相位，进而改变电流或电压输出波形的目的。例如，在 Simulink 模块中建立工频交流电源供电的单相桥式整流电路的模型后，在仿真过程中不断地调整控制角  $\alpha$  的大小，就可了解整流电路的输出曲线和晶闸管电压及电流的变化关系。具体过程如下。

#### 1. 利用模块中的既有模型组成单相桥式整流电路模型

如图 2.8 所示，将整流模块、电源模块和输出显示模块等在 Simulink 环境下连接成单相桥式整流电路仿真模型。

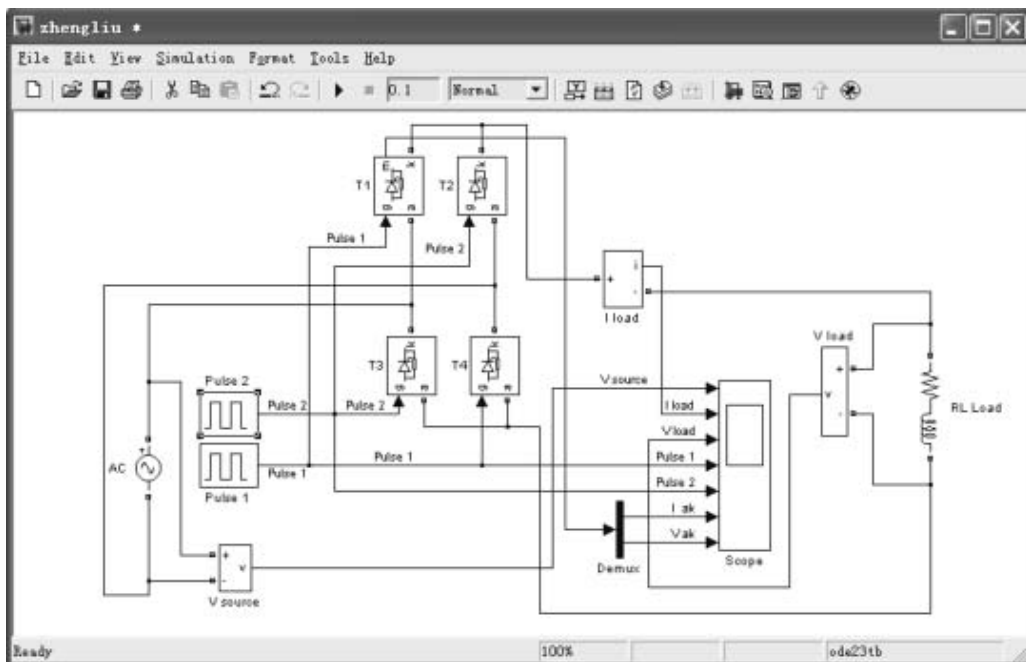


图 2.8 单相桥式整流电路仿真模型

#### 2. 在建好的模型中为相应模块变量设定具体参数

(1) 脉冲发生器参数的设置。双脉冲时差设为 0.01s，控制角设为  $\alpha = 30^\circ$ ，脉冲宽度和脉冲幅值都设为 10，滞后换相点设为 0.01/6s，如图 2.9 所示。

(2) 晶闸管部分参数的设置。晶闸管的电路组成如图 2.10 所示，晶闸管的参数设置界面如图 2.11 所示。

(3) 负载阻抗参数的设置。RLC 串联电路的具体参数取值如下： $R = 3\Omega$ ， $L = 0.1H$ ，电容为 inf。负载阻抗参数的设置界面如图 2.12 所示。

(4) 示波器输出。在界面中，将 Number of axes（轴的数量）设为 7。

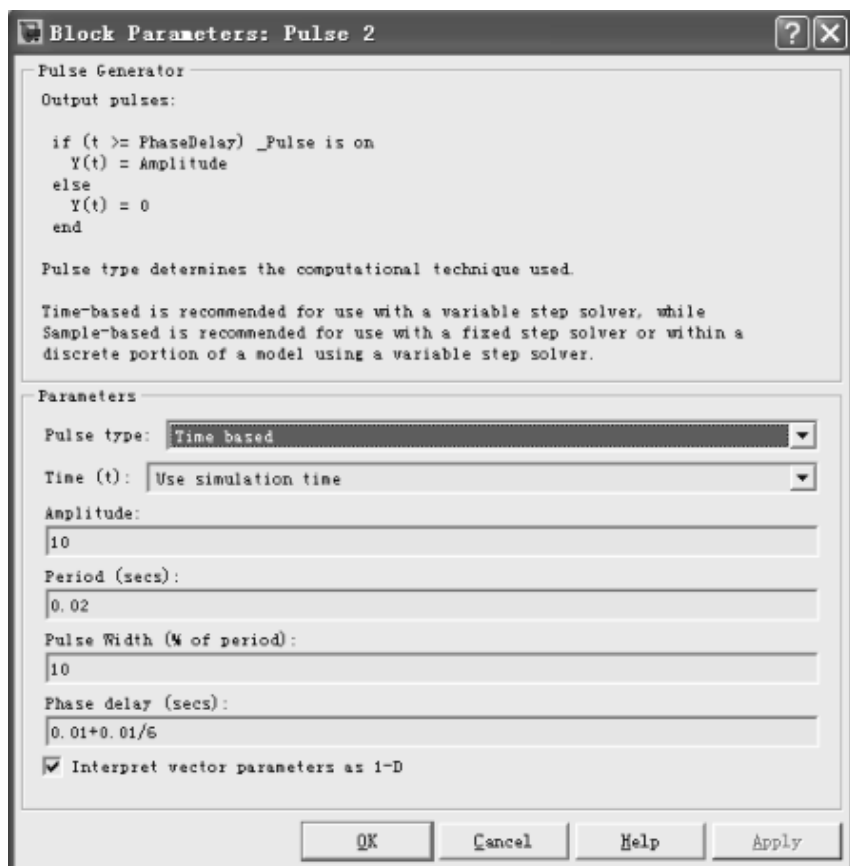


图 2.9 脉冲发生器的参数设置界面

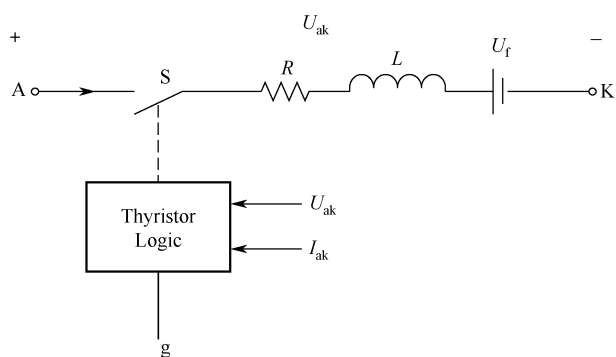


图 2.10 晶闸管的电路组成

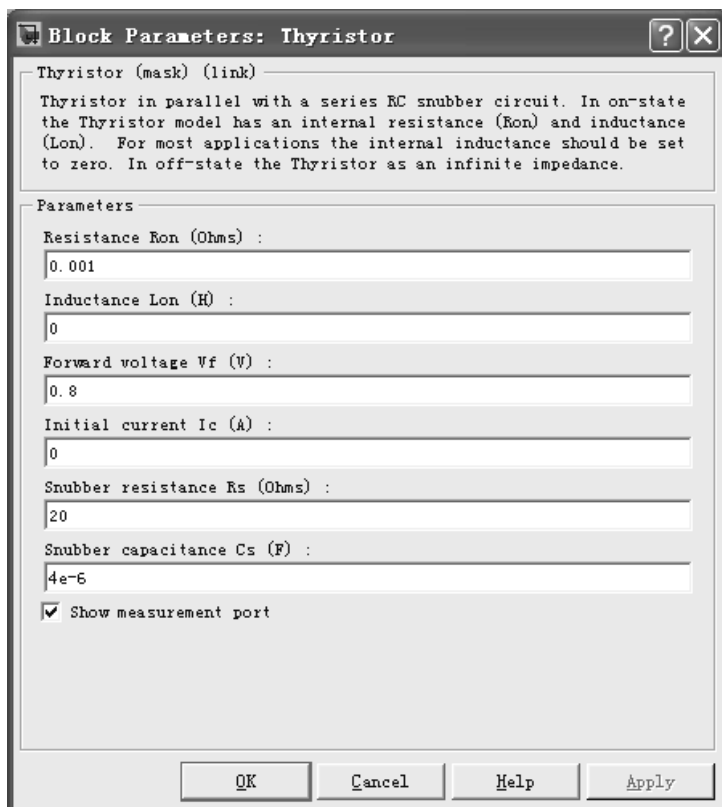


图 2.11 晶闸管的参数设置界面

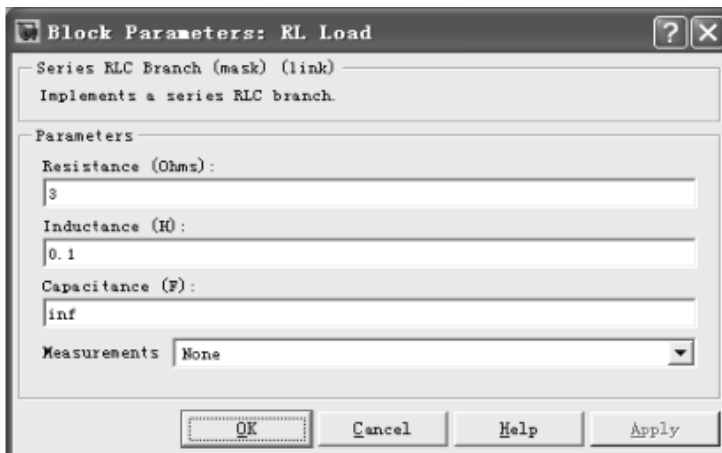



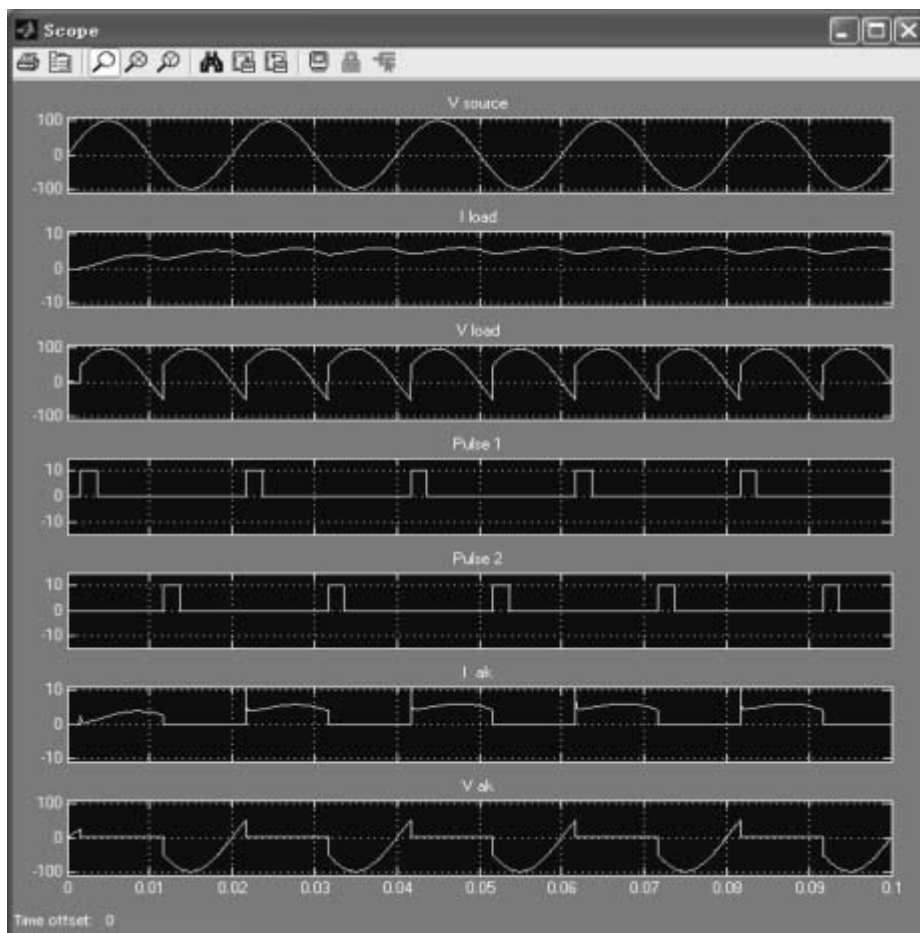
图 2.12 负载阻抗的参数设置界面

### 3. 选取仿真的计算方法

选择 ode23tb 算法，相对误差值设为  $1e-3$ ，开始时刻为  $t = 0$ ，结束时刻设为  $t = 0.1$ 。

### 4. 运行仿真程序并查看结果

单击工具栏上的图标  启动仿真程序，仿真运行得到的曲线如图 2.13 所示，即控制角  $\alpha = 30^\circ$  时，单相桥式整流电路负载和晶闸管两端电压与电流的输出变化曲线。


 图 2.13 控制角  $\alpha = 30^\circ$  时仿真输出曲线

图中，第一条曲线  $V_{source}$  为单相桥式整流电路交流侧的输入电压，第二条曲线  $I_{load}$  为直流侧输出的负载电流，第三条曲线  $V_{load}$  为整流输出负载电压，第四条曲线  $Pulse\ 1$  为晶体管  $T1$  和晶体管  $T4$  的触发脉冲，第五条曲线  $Pulse\ 2$  为晶体管  $T2$  和晶体管  $T3$  的触发脉冲，第六条曲线  $I_{ak}$  为流过晶闸管的电流，最后一条曲线  $V_{ak}$  为晶闸管两端的电压。要得到其他控制角的输出曲线，只需调整脉冲发生器的延迟角，因此充分体现了 Simulink 建模的快捷性和高效性。

## 2.7.2 三相桥式整流电路的 Simulink 动态建模分析

### 1. 利用软件中的既有模块搭建三相桥式整流电路模型

在 Simulink 环境下搭建的三相桥式整流电路仿真模型如图 2.14 所示。仿真的具体操作过程如下：改变控制晶闸管的导通顺序和控制角的大小，仿真得到不同时刻电路的输出电压变化波形。从图中可以看出，在所搭建的模型中，通用整流桥模块由 6 个晶闸管构建而成，电路的触发脉冲来自 6 脉冲发生器装置，在三相桥式整流电路仿真的过程中，可在脉冲发生器的输出端利用信号分离装置提取输出的脉冲信号，进而在示波器中显示仿真运算输出的触发信号。

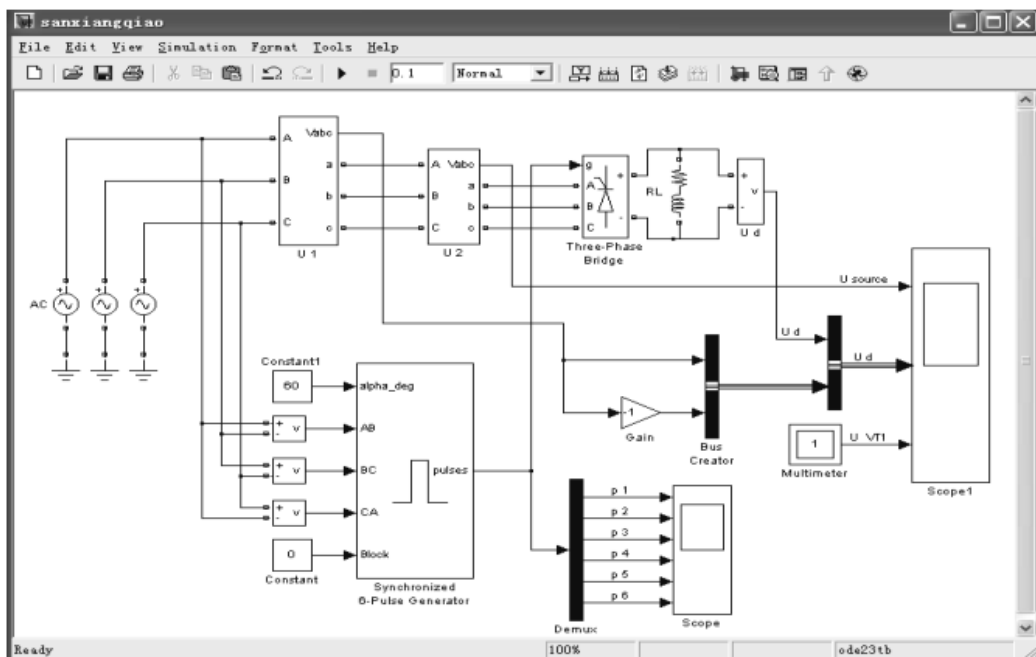


图 2.14 三相桥式整流电路仿真模型

## 2. 分别输入已搭建好模块所需的参数

(1) 通用整流桥模块 (Universal Bridge)，如图 2.15 所示，其输入/输出端口说明如下：端口 A、B 和 C 分别连接三相交流电源的相电压输入端；端口 g 为触发脉冲输入端，可以设定电力二极管；端口 “+” 和 “-” 分别和负载端连接，以便形成回路。

(2) 同步脉冲触发器模块 (Synchronized Pulse Generator)，其端口分配如图 2.16 所示，包括 6 个晶闸管和 6 脉冲触发器，其中双脉冲间隔角为  $60^\circ$ 。图 2.17 所示为同步 6 脉冲触发装置的参数设置界面。

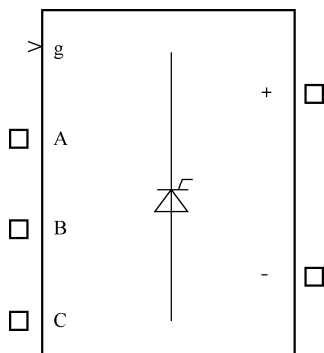


图 2.15 通用整流桥模块

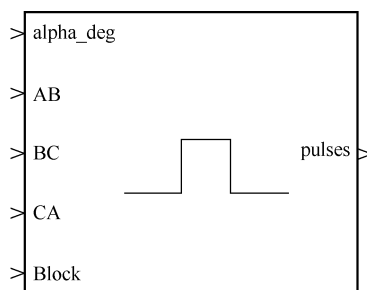


图 2.16 同步脉冲触发器模块

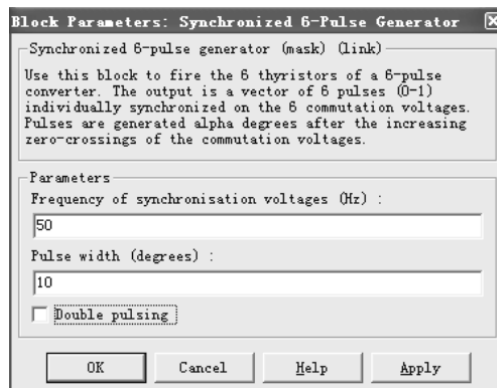



图 2.17 同步 6 脉冲触发装置的参数设置界面

### 3. 电路整体仿真运行参数设置

通常采用 ode23tb 算法, 相对误差一般设为  $1e-3$ , 仿真启动时刻设为  $t=0$ , 结束时刻设为  $t=0.1$ 。

### 4. 运行仿真程序并查看输出曲线

单击工具栏上的图标  启动仿真程序, 程序运行结束后, 示波器输出的脉冲如图 2.18 所示。输出整流波形时, 各路信号波形的初始线型均设为实线, 控制角  $\alpha = -60^\circ$  时, 应在 MATLAB 主命令窗口中输入两条命令: `set(0, 'ShowHiddenHandles', 'On')` 和 `set(gcf, 'menubar', 'figure')`。

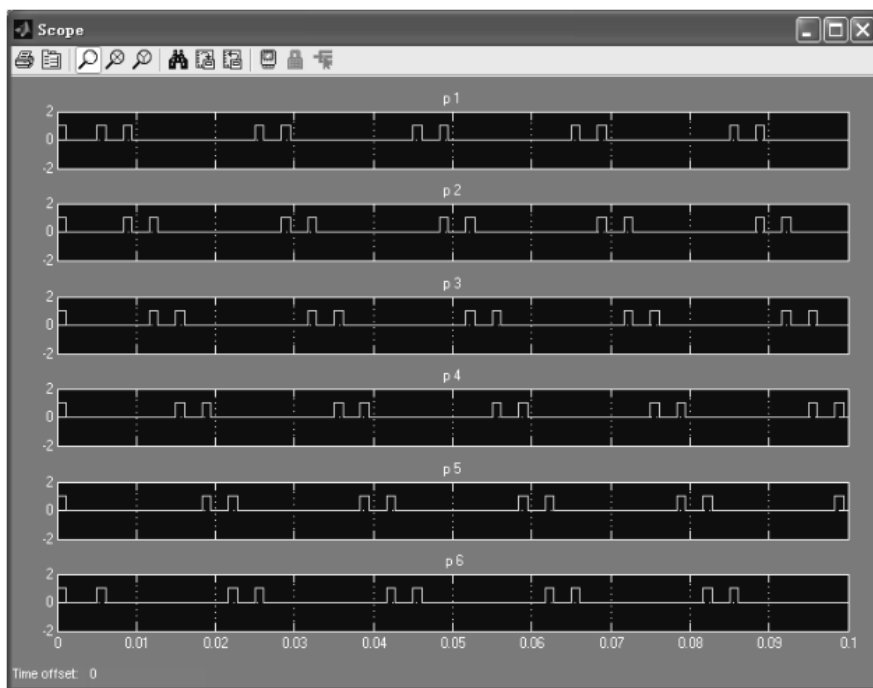
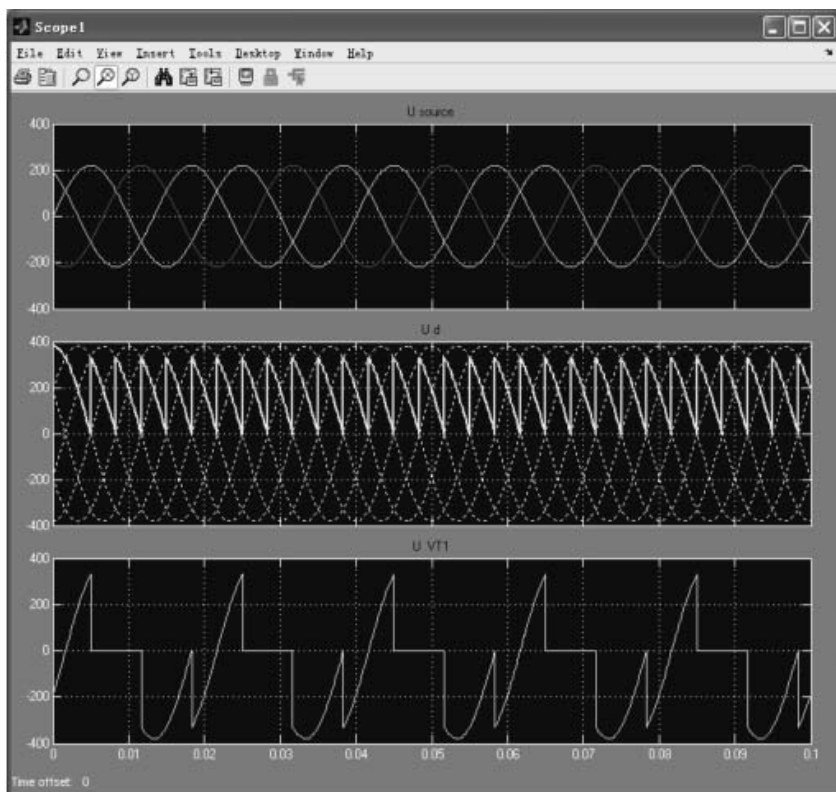


图 2.18  $\alpha = -60^\circ$  时的触发脉冲波形

将控制角更改为  $\alpha = 60^\circ$ , 并更改各路信号波形的初始线型设置, 可得到如图 2.19 所示的三相桥式整流电路的输出。




 图 2.19  $\alpha = 60^\circ$  时的输出曲线

### 2.7.3 输电线路出现故障时的建模和仿真分析

电力系统在 MATLAB 中的模型，一般可用如图 2.20 所示的示意图表示。通常情况下，电网的电压最高是 220kV，至少要有两个独立的电源为系统提供电能：一个电源是 G，它是额定容量为 500MVA 的发电机；另一个电源是系统容量无穷大的电网。系统运行正常时，若某个时刻在线路的 k 点处突然发生三相或单相短路故障，则可让继电保护装置跳闸来分开断路器 QF1 和 QF2，从而把发生故障的线路从电网中分离，而未发生故障的线路部分则正常工作，因此系统的稳定性较好。

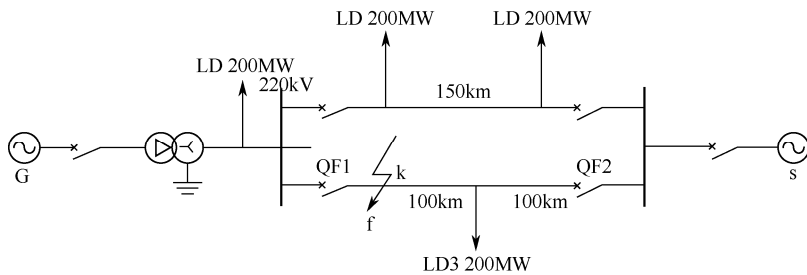


图 2.20 电力系统示意图

使用仿真软件搭建输电线路模型后，可通过仿真分别研究系统的故障状况及故障清除后断路器重合闸的变化情况。

由于电力系统保护装置的动作非常灵敏可靠，因此当某段线路发生故障后，继电保护装置会立即将其切除，使得故障的持续时间很短。故障消失后，利用断路器的重合闸可恢复发生故障的线路，使其正常运行。

### 1. 搭建输电系统的仿真模型

采用图 2.20 所示的电力系统示意图，在 Simulink 环境下生成如图 2.21 所示的线路自动重合闸仿真模型。

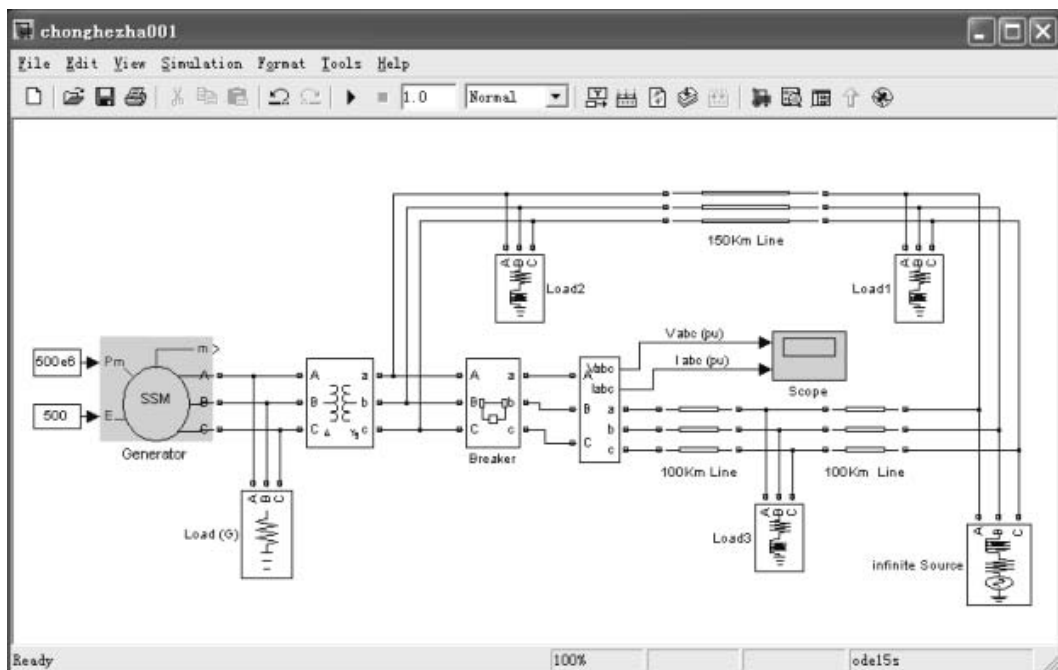


图 2.21 线路自动重合闸仿真模型

### 2. 对已搭建好的系统中的所有变量赋值

- (1) 同步发电机模块参数的设定情况如图 2.22 所示。
- (2) 三相变压器模块参数的设定情况如图 2.23 所示。
- (3) 长度为 150km 线路的分布参数设定情况如图 2.24 所示。
- (4) 长度为 100km 线路分布参数的设定情况如图 2.25 所示。
- (5) 三相电压源参数的设定情况如图 2.26 所示。
- (6) 三相串联负载 1 的参数设定情况（负载 2、负载 3 与负载 1 的负荷设置完全相同）如图 2.27 所示。
- (7) 厂用三相串联负载模块参数的输入界面如图 2.28 所示。
- (8) 断路器模块参数的设置如图 2.29 所示。
- (9) 三相电压电流测量（Three-Phase V-I Measurement）部分的界面如图 2.30 所示。

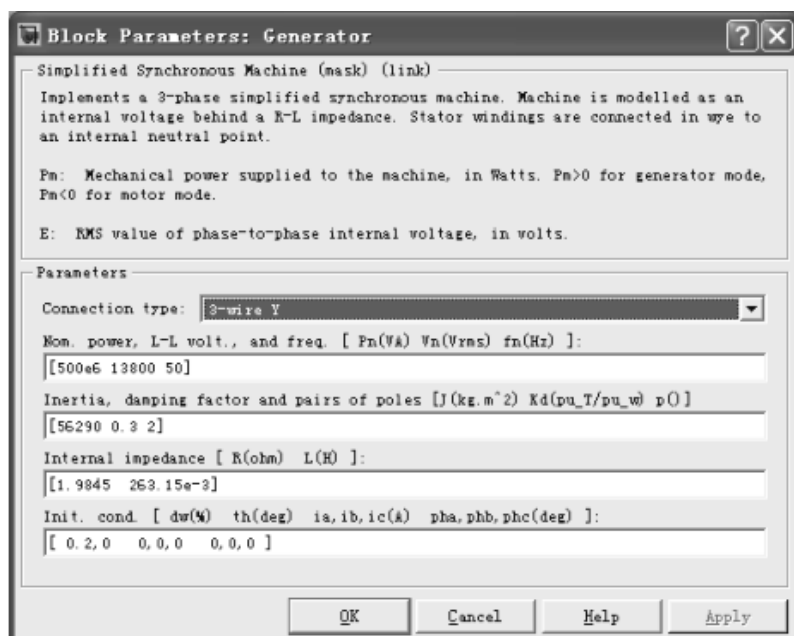


图 2.22 同步发电机模块参数设定

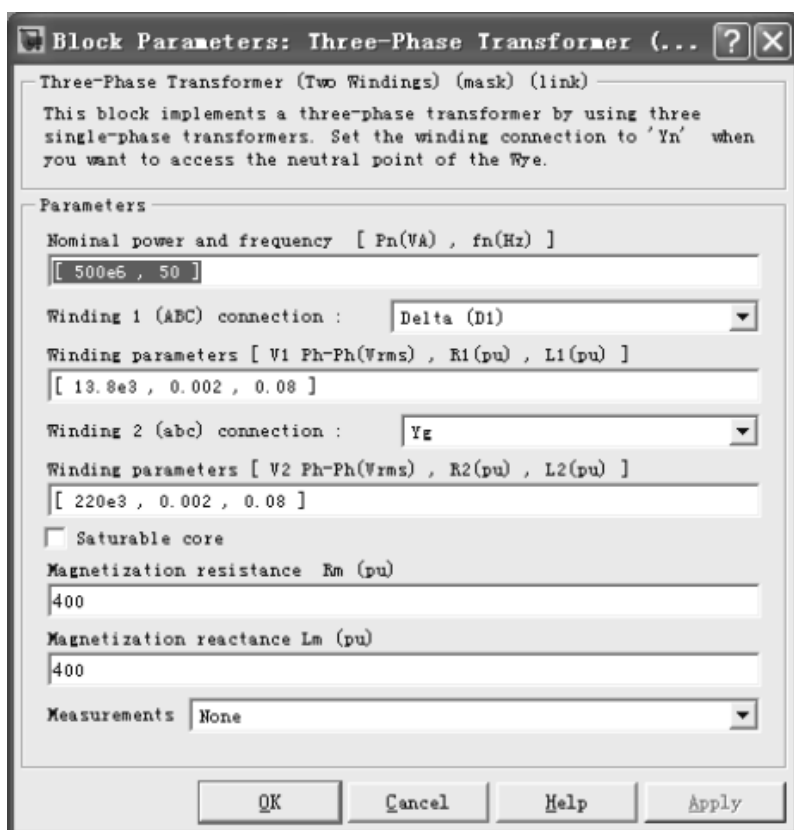


图 2.23 三相变压器模块参数设定

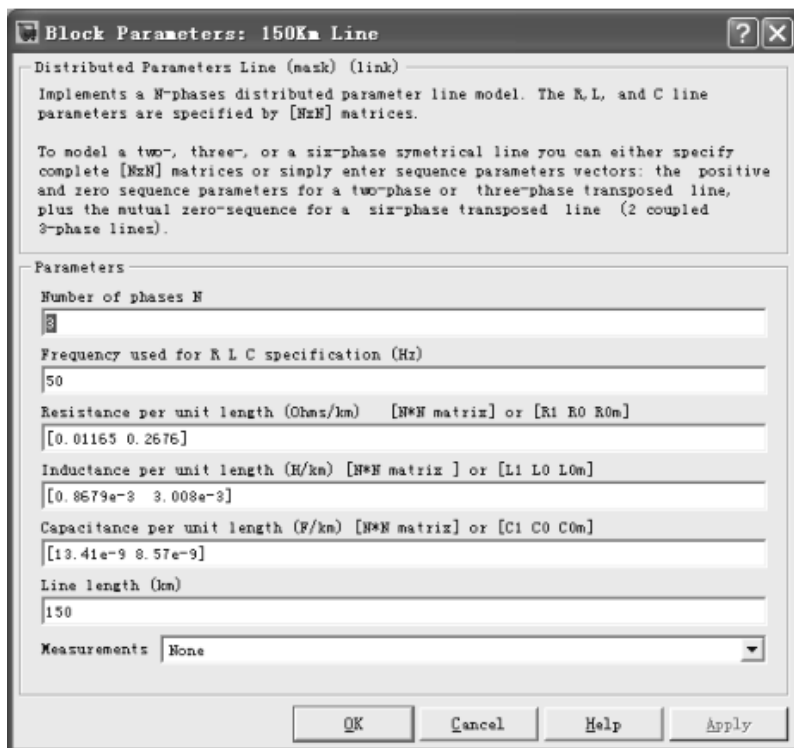


图 2.24 长度为 150km 输电线路参数设定

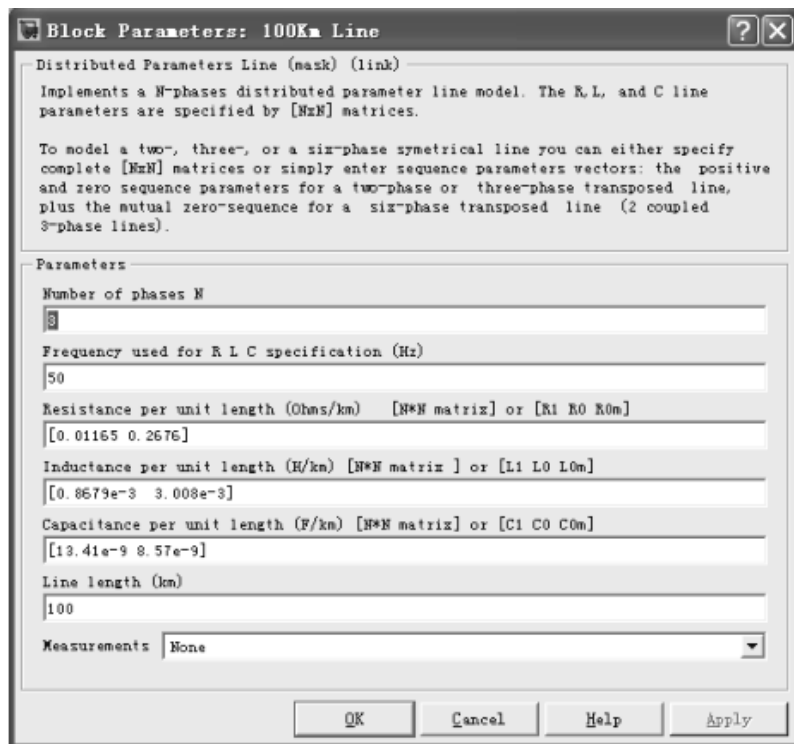


图 2.25 长度为 100km 线路参数设定

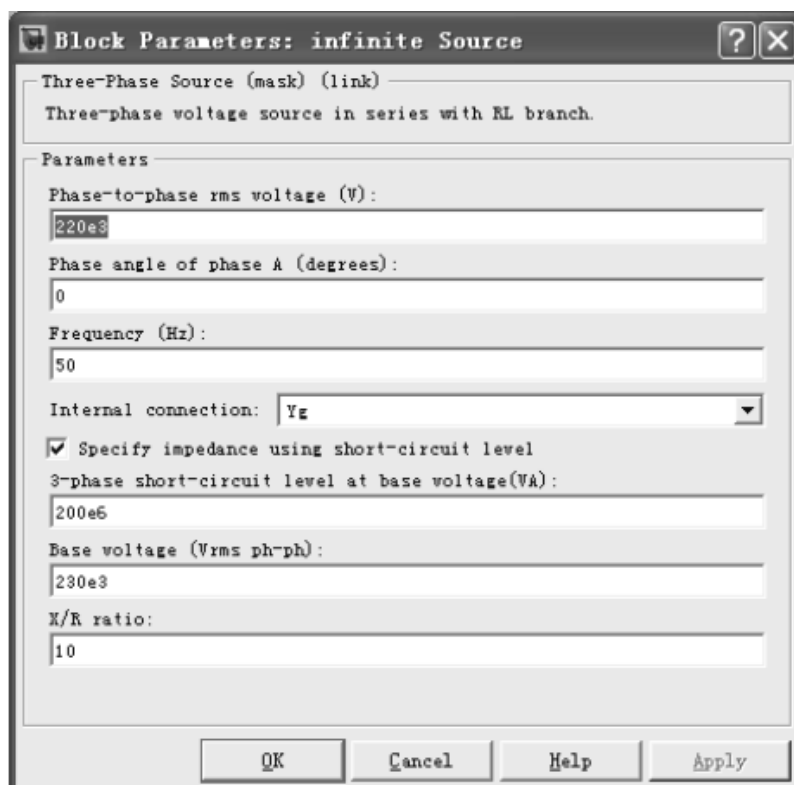


图 2.26 三相电压源模块参数设定

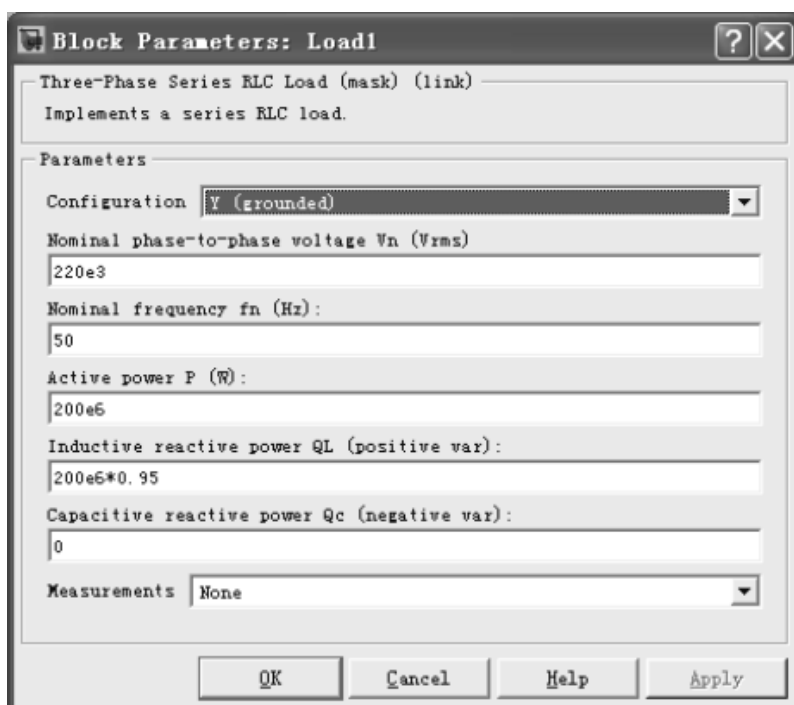


图 2.27 负载 1~负载 3 三相串联模块参数设定

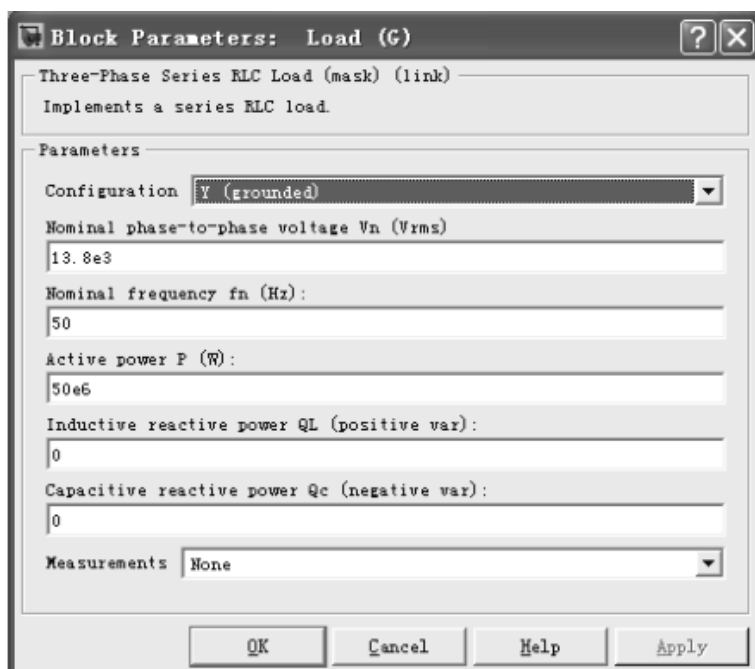


图 2.28 厂用三相串联负载模块参数设定

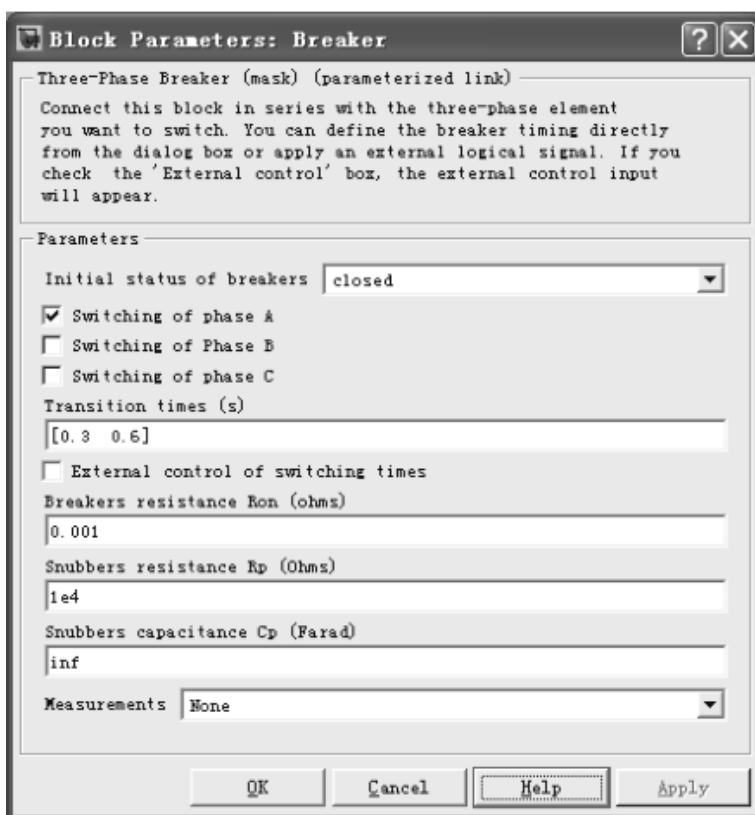


图 2.29 三相交流断路器模块参数设定

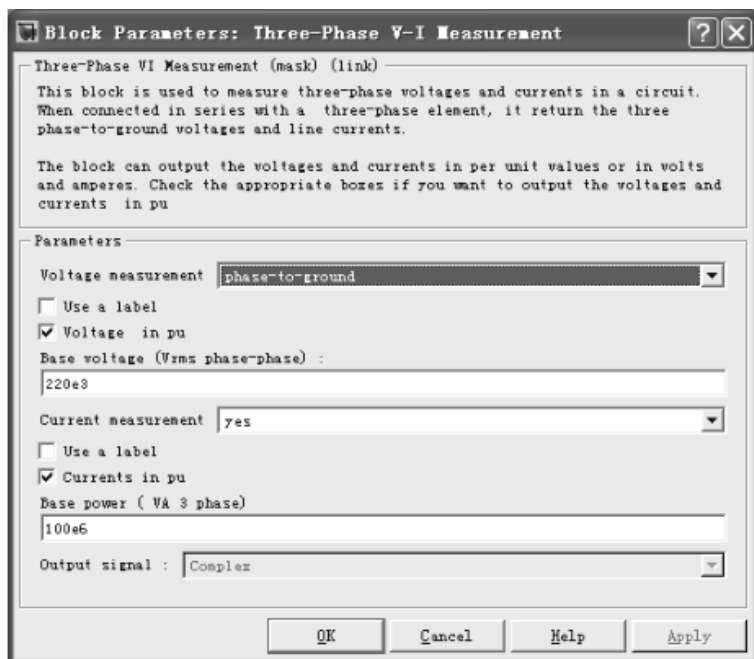



图 2.30 三相交流 V-I 测量模块界面

### 3. 整体系统仿真参数的设置

将仿真过程中的相对误差设为  $1e-3$ ，在  $t=0$  时刻仿真启动，在  $t=1$  时刻结束仿真，其他参数使用默认值。

### 4. 运行仿真程序并查看仿真分析结果

单击工具栏上的图标 ，启动已建好的系统模型。正常情况下，仿真完成后，单击输出示波器能够看到故障发生时刻电压和电流的变动波形。下面分别给出输电线路单相和三相故障重合闸的仿真情况。

(1) 输电线路单相故障后的重合闸过程。在仿真模型中，将断路器模块发生故障处的一相参数设为 A 相，假设该断路器当前处于合闸状态，即系统目前正常运行。为缩短仿真的时间，将断路器的故障切换时限设为  $t=0.3\sim 0.6$ ，也就是模型开始运行后，在时刻  $t=0.3s$  线路发生 A 单相接地故障，此时断路器在保护装置的作用下跳闸，而在时刻  $t=0.6s$  断路器在检测装置的作用下自动合闸，即模拟故障清除后的重新合闸过程。在以上仿真过程中，对于系统母线侧的参数，我们主要关心线路电压和线路电流的变化情况，如图 2.31 所示。

因为这一模型系统采用双电源供电，输电线路中的某点出现单相接地故障时，继电保护的作用使得断路器跳闸，从而切除故障，因此在仿真结果曲线中可以见到此时母线电压的变化波动不大；在发生单相接地故障期间，即对应的曲线段  $t=0.3\sim 0.6s$ ，断路器的 A 相跳闸，所以 A 相电流消失，而未发生故障的 B 相和 C 相的电流波动变小；在故障解除即  $t=0.6s$  之后的过程中，断路器重新合闸，线路中的 A、B、C 三相电流在过渡过程结束后，逐步恢复到正常值，此时输电线路的三相电流波形为对称的三相电流波形。

(2) 输电线路三相故障后的重合闸过程。在仿真模型中，将断路器模块发生故障处的 A 相、B 相和 C 相同时设为故障发生处，该断路器当前处于合闸状态，即系统目前正常运行。将断路器的故障转换范围限定为  $t=0.3\sim 0.6s$ ，这时可在时刻  $t=0.3s$  模拟输电线路 A、B、

C 三相同同时出现故障的情形，此时断路器在保护装置的作用下跳闸，在时刻  $t = 0.6\text{s}$ ，断路器在检测装置的作用下自动合闸，即模拟故障清除后的重新合闸过程。此时，对于系统母线侧的参数，我们主要关心线路电压和线路电流的变化情况，如图 2.32 所示。线路中的 A、B、C 三相电流在过渡过程结束后，逐步恢复到正常值，这时输电线路的三相电流波形为对称的三相电流波形<sup>[22]</sup>。

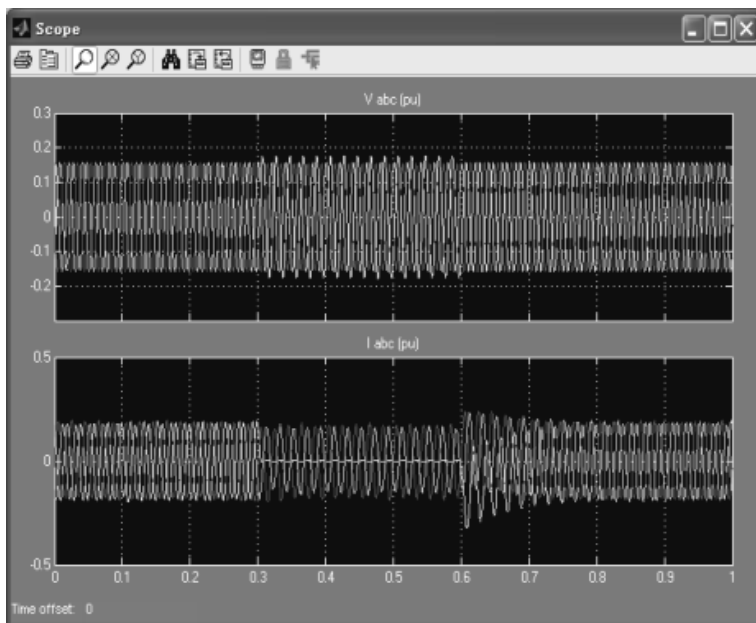


图 2.31 单相重新合闸时故障发生处的电压和电流波动

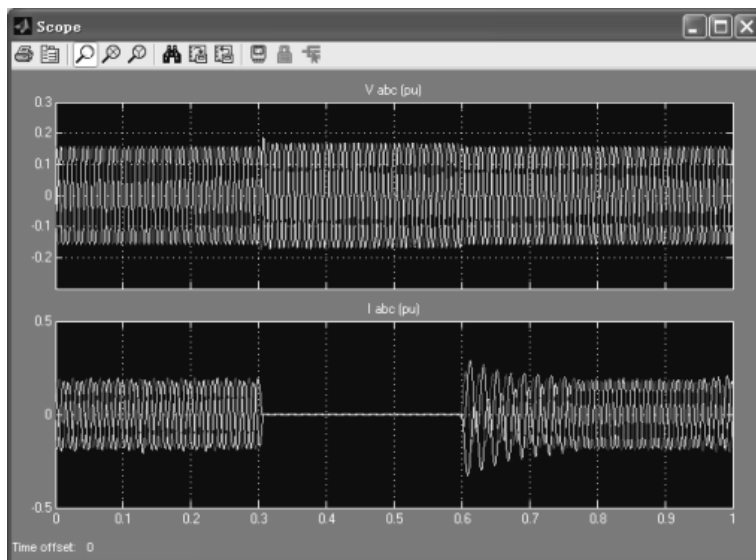


图 2.32 三相重新合闸时故障发生处的电压和电流波动



# 第3章 风力发电系统 Ansoft 有限元仿真基础

本章主要介绍在实际的发电机设计中,如何快速高效地使用 Ansoft 中的 RMxp<sub>rt</sub> 发电机分析软件。RMxp<sub>rt</sub> 按照等效电路和磁路的设计理念来计算,可以仿真多种常见的电动机或发电机。RMxp<sub>rt</sub> 具有模型设置简单快捷、参数调整方便等优点。今天,发电机性能和指标的要求持续提高,因此需要提升发电机设计的手段。在发电机的本体研究中,有限元设计一直是高效的设计方法之一。

最新版的 Ansoft 中含有 RMxp<sub>rt</sub> 发电机分析环境,其中的常用电动机和发电机分为 12 大类 15 种。

在简单的对话框中,输入仿真研究的发电机参数后,可把在 RMxp<sub>rt</sub> 中计算完成的模型一键导入二维或三维有限元瞬态场中进行分析与计算。在二维瞬态场环境下生成发电机模型后,可对发电机的各个组成部分赋予不同的材料,手动或自动确定磁场分析边界,分配激励源并对模型进行网格剖分,自动完成 RMxp<sub>rt</sub> 到 Maxwell 2D 的转换。

## 3.1 RMxp<sub>rt</sub> 在发电机仿真中的基本操作

为了说明如何利用 Ansoft 软件对发电机进行仿真研究,下面先介绍一个简单的发电机建模和仿真分析实例。由于发电机和电动机的运行原理正好相反,因此在建立电动机模型后,更改相应的仿真参数,设置为发电机运行状态,再进行电磁参数的仿真,就可节省大量的建模时间。

下面以一台三相异步发电机为例,详细介绍发电机环境 RMxp<sub>rt</sub> 的操作方法和详细步骤。通常, RMxp<sub>rt</sub> 发电机环境包含 12 大类、15 种电动机或发电机,如表 3.1 所示。

表 3.1 发电机或电动机的种类及名称

发电机或电动机种类	名 称
Three Phase Induction Motor	三相异步电动机
Single Phase Induction Motor	单相异步电动机
Three Phase Synchronous Machine	三相凸极同步电动机或发电机
Brushless Permanent Magnet DC Motor	永磁无刷直流电动机
Adjust Speed Synchronous Machine	变频永磁同步电动机或发电机
Permanent Magnet DC Motor	普通永磁直流电动机
Switched Reluctance Motor	开关磁阻电动机
Line Start Permanent Magnet Synchronous Motor	自启动永磁同步电动机
Universal Motor	串极整流子电动机
DC Machine	普通电励磁直流电动机或发电机
Claw-pole Alternator	爪极发电机
Three Phase Non-Salient Synchronous Machine	三相隐极同步电动机或发电机

### 3.1.1 建模方法

先在 RMxpirt 环境下输入发电机模型参数, 然后一键导入到 Maxwell 2D 动态环境中进行有限元分析, 最终得到需要的仿真结果。本例采用三相异步电动机的原模型, 具体的定子、转子槽形规格如图 3.1 所示。

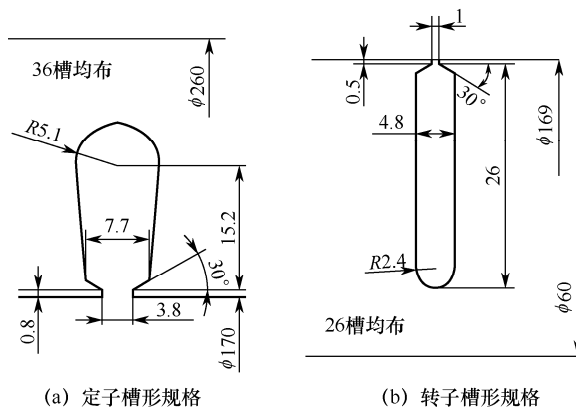




图 3.1 发电机定子、转子槽形规格

设发电机铁心轴向的长度为 155mm, 铁心材料选用型号为 D23 的硅钢片。定子绕组分布为 60°相带结构, 导线的规格是直径为 1.3mm 的铜漆包线, 每槽线圈匝数为 28, 单层布置, 绕组节距为 1~9, 定子绕组为  $\Delta$  接线方式。发电机的额定功率为 11kW, 极对数为 2, 磁场转速为 1500rpm, 三相电压源电压为 380V, 频率为 50Hz。

下面在 RMxpirt 发电机分析环境中首先建立发电机整体仿真模型, 然后在此基础上进行发电机电磁性能参数仿真。


### 3.1.2 发电机模型创建

#### 1. 确定模型发电机的类型

在 RMxpirt 发电机分析环境中, 单击工具栏上的图标 , 生成一个 RMxpirt 项目, 再单击图标 , 出现如图 3.2 所示的 Select Machine Type 对话框, 其中共包含 12 种仿真软件默认的电机类型。为叙述方便, 因为仿真软件中未提供异步发电机模型, 所以在这里先选择比较简单的 Three-Phase Induction Motor (三相交流感应异步电动机), 然后单击 OK 按钮。建模完成后, 更改相应的设置, 就可方便地生成发电机的仿真模型。

#### 2. 设定发电机各部分结构材料的类型

可把需要的新材料添加到已经创建的材料库中。系统材料库中的材料满足设计要求时, 不需要手动额外添加新材料。

如图 3.3(a)所示, 选择 Tools→Configure Libraries..., 进入 Configure Design Libraries 对话框, 如图 3.3(b)所示, 单击相应的单选按钮以选中相应的材料, 然后单击按钮  将选中的材料导入到右侧的 Configured Libraries 框中, 再单击 OK 按钮。

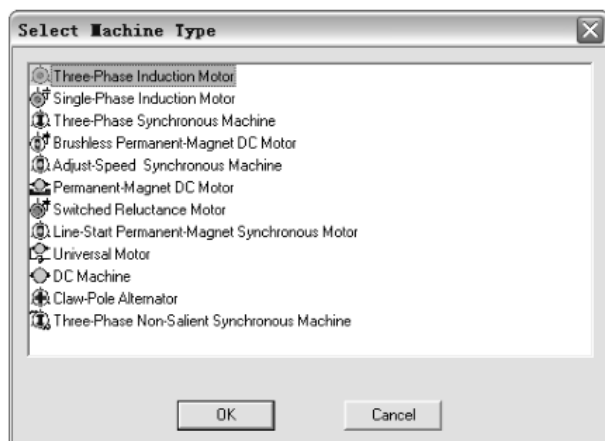
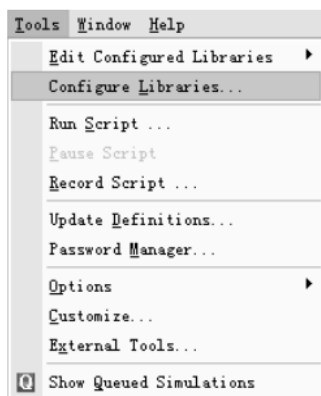
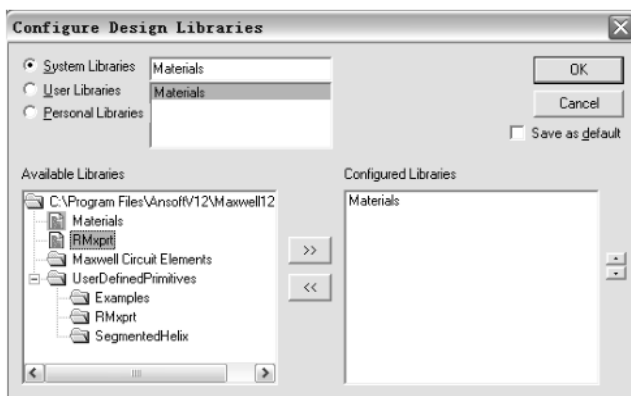


图 3.2 Select Machine Type 对话框



(a) 发电机材料库的选择路径



(b) Configure Design Libraries 对话框

图 3.3 选择发电机材料库

### 3. 设定导线规格

Ansoft 软件默认的发电机定子、转子导线规格为美国国家标准格式。设置这一参数时，为准确输入数据，先要把导线的标准选定为中国国家标准规格。

如图 3.4 所示，选择 Tools→Options→Machine Options。在打开的 Machine Editor Options 对话框中，选择 Wire Setting 区域的单选项 System Libraries，然后在右侧的下拉菜单中选择 Chinese，最后单击“确定”按钮，如图 3.5 所示。

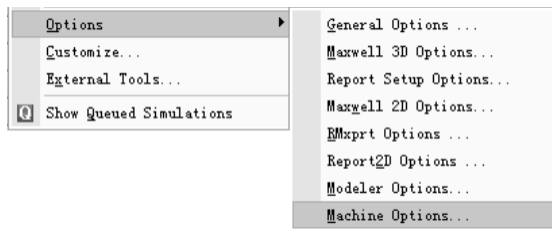


图 3.4 发电机导线规格设置路径



图 3.5 Machine Editor Options 对话框

### 3.1.3 发电机主要结构变量的输入

在创建好的发电机项目管理器中，单击发电机模型工程树，选择 Three Phase Induction Motor。发电机、定子、转子选项的前面都有符号“+”，单击这一符号会出现下拉选项。Stator（定子）下拉选项中包括 Slot（槽形）和 Winding（绕组）两个选项，Rotor（转子）下拉选项中也包括 Slot（槽形）和 Winding（绕组）两个选项，如图 3.6 所示。单击相应的选项即可输入需要的尺寸参数。

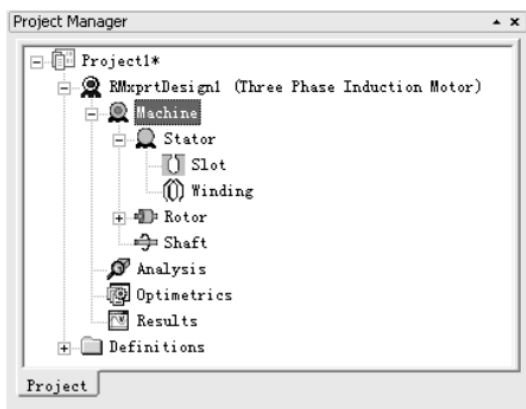


图 3.6 在发电机项目管理器中输入结构变量

#### 1. 发电机整体参数输入

单击图 3.6 所示工程树中的 Machine 选项，打开如图 3.7 所示的界面，按照发电机各部分的名称，把相应的发电机额定设计参数输入到相应的位置：从上到下依次输入发电机结构类型、发电机的极数、发电机铁心系数、摩擦损耗、绕组损耗和转子额定转速，输入后的参数如图 3.7 中所示。

#### 2. 定子结构参数输入

(1) 发电机的整体参数输入完成后，单击“确定”按钮，接着输入定子结构参数。单击图 3.6 中的 Stator 选项，打开图 3.8 所示的定子参数输入界面。

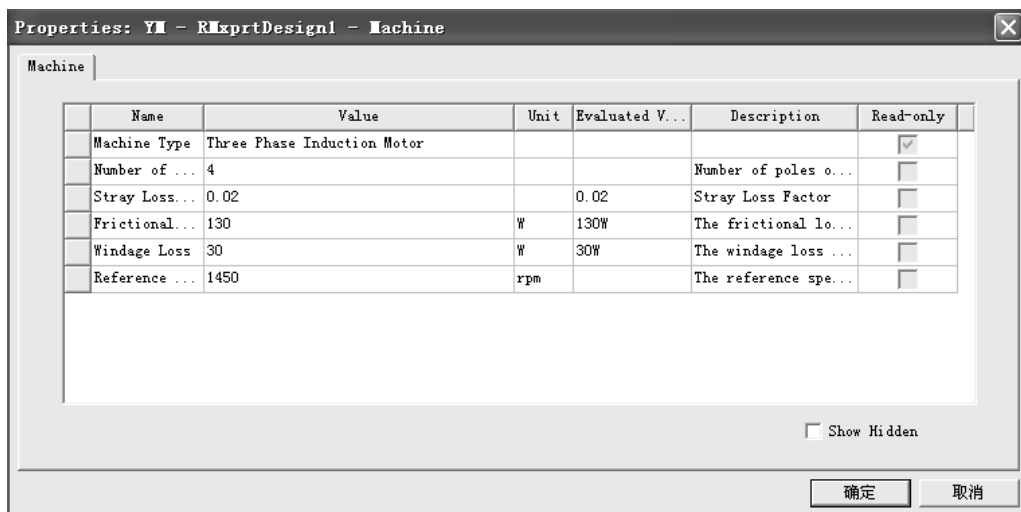


图 3.7 输入发电机整体参数

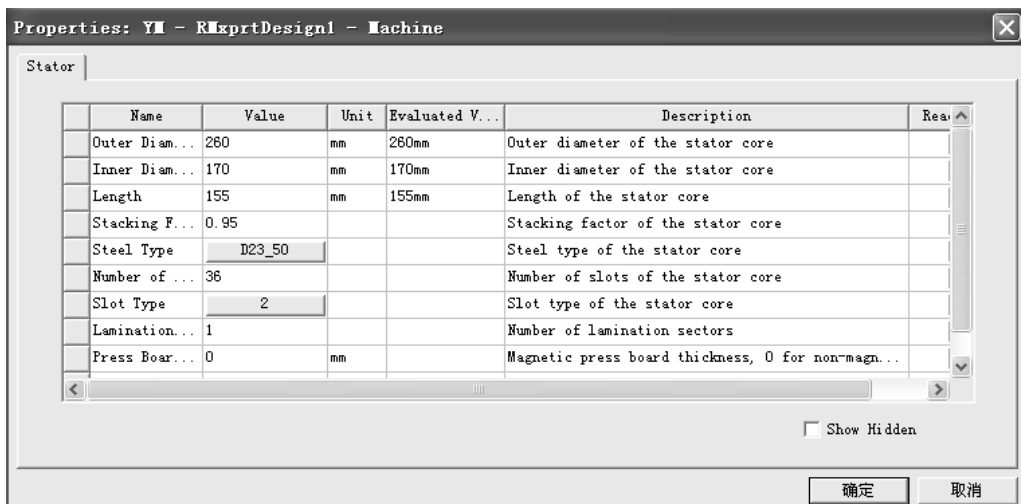


图 3.8 定子参数输入界面

图 3.8 所示定子铁心参数的说明如表 3.2 所示。

表 3.2 发电机定子铁心参数说明

铁心参数	说 明	铁心参数	说 明
Outer Diameter	定子铁心外直径, 260mm	Number of Slots	定子槽数, 36
Inner Diameter	铁心内直径, 170mm	Slot Type	定子槽形, 2 号梨形槽
Length	铁心长, 155mm	Lamination Sectors	定子冲片的扇形分瓣数, 1
Stacking Factor	铁心系数, 0.95	Press Board Thickness	定子端部压板厚度, 0
Steel Type	硅钢片材质, D23_50	Skew Width	定子的斜槽数, 0

(2) 单击图 3.8 中的铁心类型选择按钮, 打开如图 3.9 所示的对话框, 从中选定发电机定子铁心的类型, 此处选择 D23\_50 硅钢片材料。

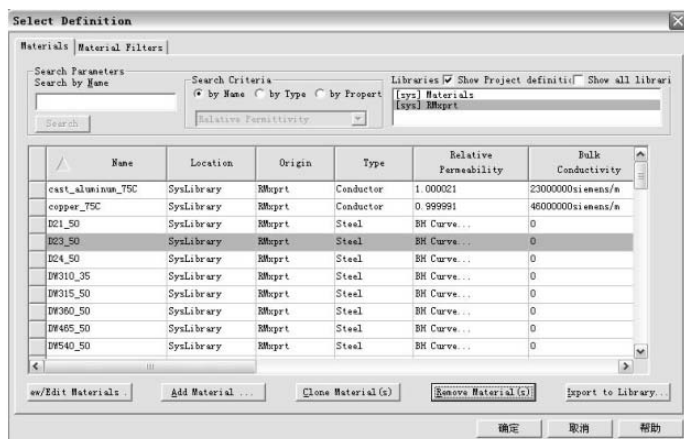


图 3.9 选择定子铁心类型

(3) 单击图 3.8 中的定子槽形按钮，打开如图 3.10 所示的对话框，其中列出了 6 种常见的槽形，此处选择 2 号梨形槽。选择完毕后，单击 OK 按钮退出。

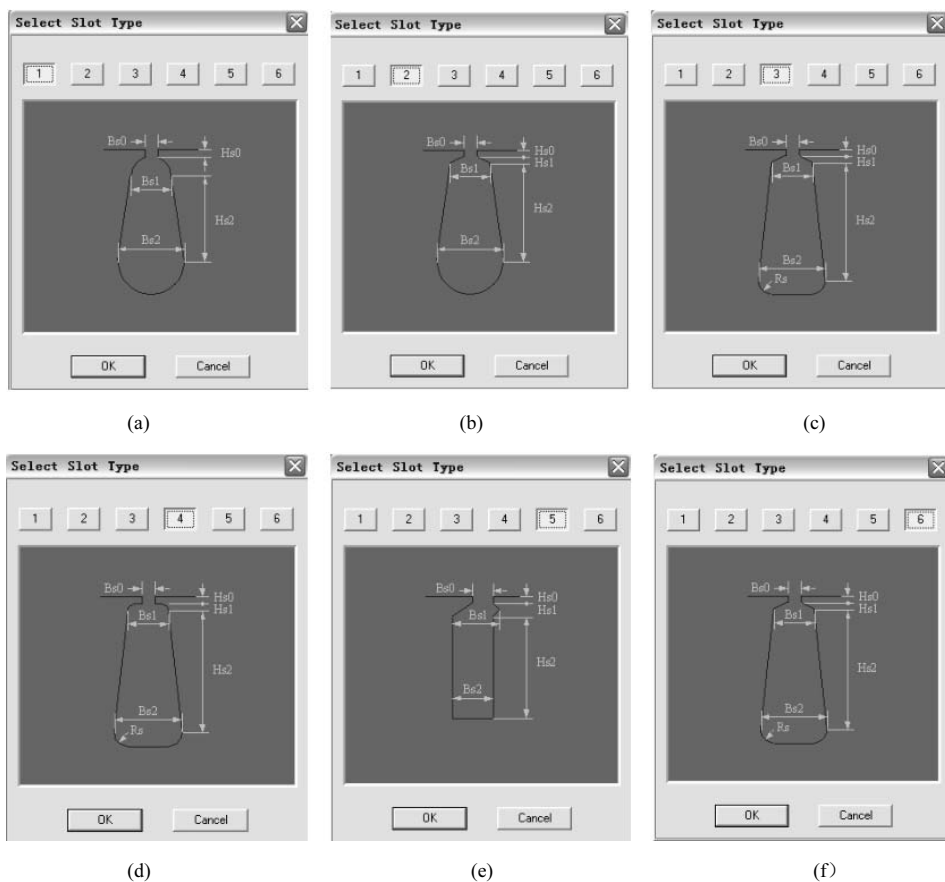


图 3.10 选择定子槽形

### 3. 槽形参数输入

(1) 单击工程树中 Stator 前面的“+”号，打开下一级选项，其中包含 Slot（槽形）和

Winding（绕组）两个选项。

(2) 单击工程树中 Stator 下的 Slot 选项，打开如图 3.11 所示的槽形参数对话框。

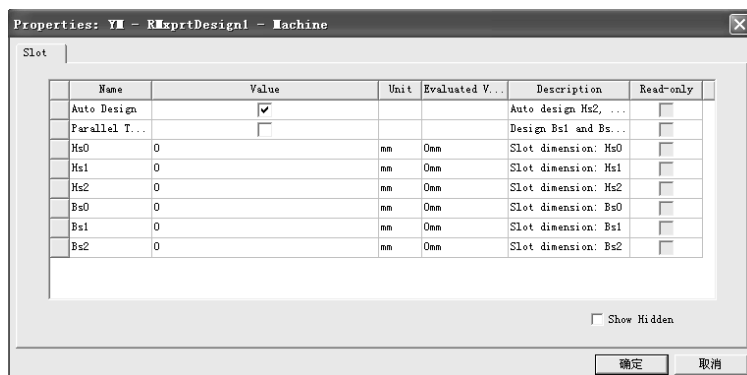


图 3.11 定子槽形参数对话框

取消对自动设计的选取后，界面中会出现 2 号槽形的所有参数，如图 3.12 所示，各槽形参数的具体含义如图 3.10(b)所示。

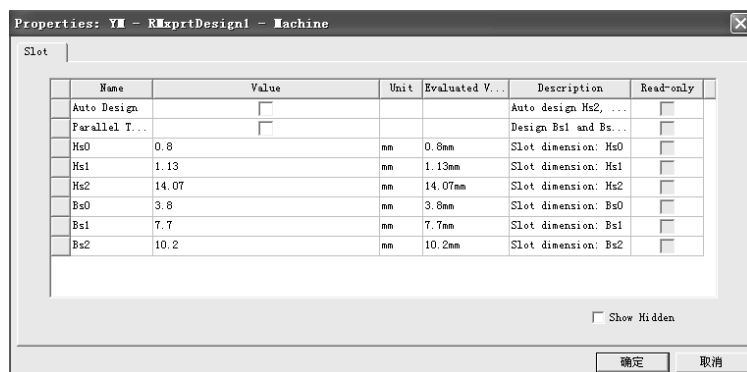


图 3.12 2 号定子槽形的所有尺寸

#### 4. 绕组参数设定

(1) 单击工程树中 Stator 下的 Winding（绕组）选项，打开如图 3.13 所示的界面。

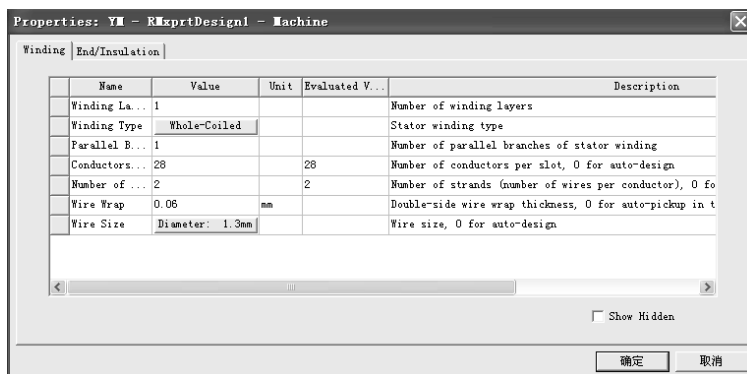


图 3.13 定子绕组参数对话框

图 3.13 中各参数的设定值如表 3.3 所示，定子绕组连接形式如图 3.14 所示。

表 3.3 定子绕组参数设定值

参数名	设定值	参数名	设定值
Winding Layers	本例的绕组层数是 1	Number of Strands	一匝线圈的并绕根数为 2
Winding Type	绕组的匝间全极式连接	Wire Wrap	漆包线绝缘的厚度为 0.06mm
Parallel Branches	绕组的并联支路数为 1	Wire Size	导线直径，选持 1.3mm
Conduction perSlot	每槽匝数，样机为单层绕组，每槽 28 匝		

(2) 导线直径的单位是毫米。导线有 Round（圆形）和矩形（Rectangle）两种，本例选择 Round，尺寸选为 MIXED（混合），如图 3.15 所示。

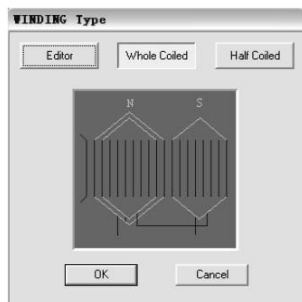


图 3.14 定子绕组连接形式

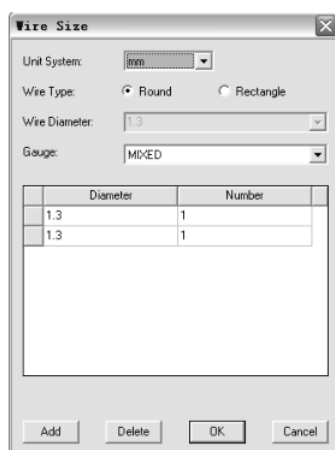


图 3.15 导线直径确定

(3) 单击图 3.13 中的 End/Insulation 选项卡，打开如图 3.16 所示的界面。

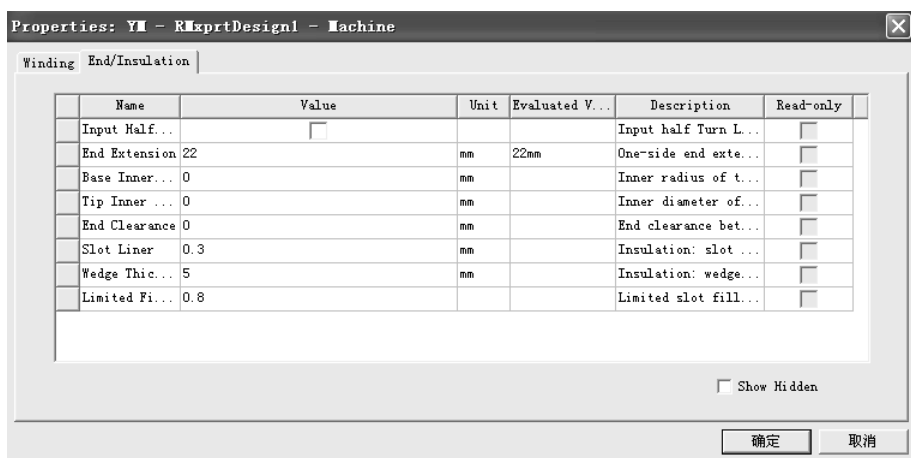


图 3.16 定子绕组参数输入界面

图 3.16 中自上而下的参数的说明如表 3.4 所示<sup>[23]</sup>。



表 3.4 发电机定子绕组端部和槽绝缘选项

发电机定子绕组端部和槽绝缘选项	说 明
Input Half-turn Length	输入定子绕组的半匝长度
End Extension	绕组伸出铁心断面外的直线段长度为 22mm
Base Inner Radius	端部绕组限定尺寸, 采用默认值
Tip Inner Diameter	端部绕组限定尺寸, 采用默认值
End Clearance	端部绕组限定尺寸, 采用默认值
Slot Liner	槽绝缘厚度为 0.3mm
Wedge Thickness	定子槽楔厚度为 5mm
Limited Fill Factor	最高定子槽满率为 0.8mm

输入定子铁心和绕组尺寸后, 选中定子项, 单击主界面中部的 Main 按钮, 弹出定子铁心模型, 如图 3.17 所示。

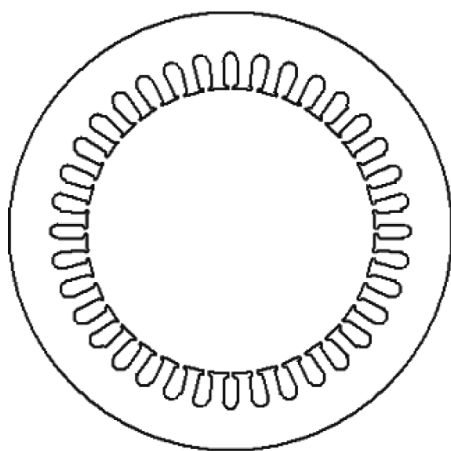


图 3.17 定子铁心模型

同理, 单击绕组的 Edit 按钮, 弹出定子绕组编号, 如图 3.18 所示。

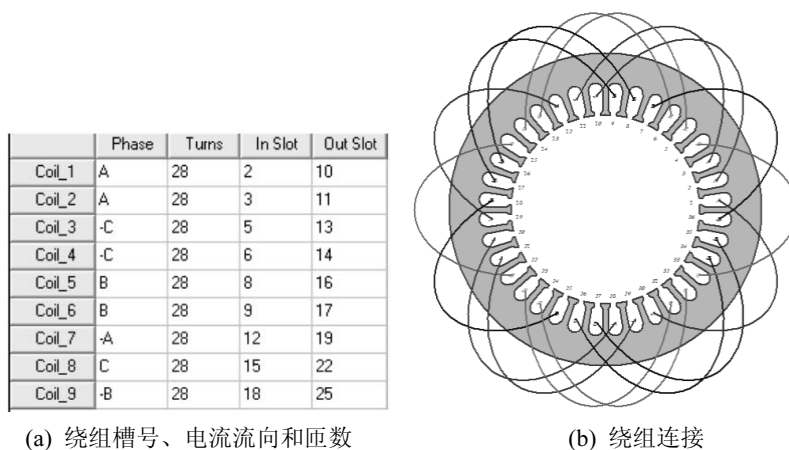


图 3.18 定子绕组编号

### 3.1.4 转子尺寸的输入

(1) 单击工程树中的 Rotor（转子）选项，打开如图 3.19 所示的转子参数输入对话框。

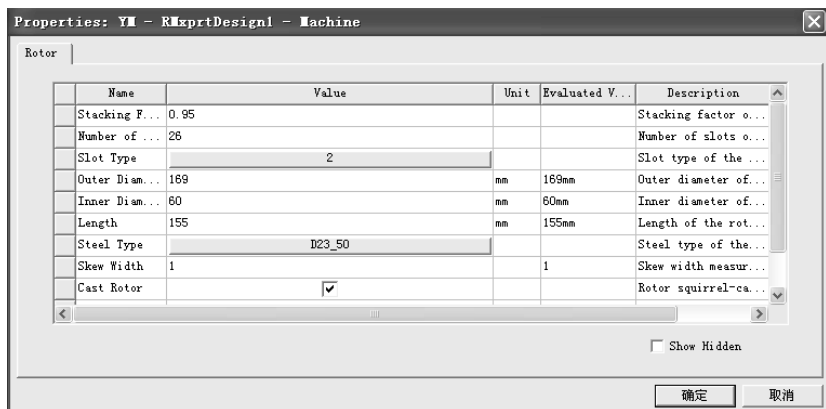


图 3.19 转子参数输入对话框

图 3.19 中，自上而下的参数的说明如表 3.5 所示<sup>[23]</sup>。

表 3.5 转子参数及其说明

转子参数	说 明
Stacking Factor	发电机定子铁心叠压系数，选为 0.95
Number of Slots	转子槽数，该电机为转子 26 槽结构
Slot Type	转子槽形代号，这里选 2 号槽形
Outer Diameter	转子外径，参照前面的图纸尺寸，选为 169mm
Inner Diameter	转子内径，发电机转子内径为 60mm，转子铁心与转轴采用压入的过盈配合
Length	转子轴向长度，样机的定子、转子铁心等长度，该值选为 155mm
Steel Type	转子冲片材料类型，采用 D23 作为定子、转子铁心材料，该项选为 D23_50
Skew Width	斜槽数。为了消除气隙中的高次谐波成分，采用转子斜槽结构，该项描述的就是斜槽。注意，软件中的斜槽是以所斜过槽的个数为计量单位的，即转子斜过了 1 个齿槽的距离
Cast Rotor	铸造转子。样机转子为铸铝结构，所以选择该项。与之不同的是，中大型异步发电机为了降低转子损耗，往往采用转子嵌入铜条作为鼠笼结构，在设计这样的电机时，该项不选择
Half Slot	转子半槽选择，功率稍大一些的异步发电机往往采用刀片槽结构，实际上就是在凸槽结构的基础上，仅取其沿径向一半槽的结构，电机设计中称之为半槽。该项选定后，转子槽形尺寸要按照全槽尺寸输入，但生成模型时仅留下右侧的一半。该项不选择
Double Cage	双鼠笼设置。为提高起动转矩，有时发电机会采用双鼠笼结构，上层笼为启动笼，下层笼为运行笼，此时上下笼的槽形可以分别设置

(2) 单击工程树中 Rotor（转子）选项前的“+”，打开下一级选项，其中包含 Slot（槽形）和 Winding（绕组）两个选项。单击 Slot，打开 Select Slot Type 对话框，如图 3.20 所示，本例选 2 号梨形槽。

(3) Slot（槽形）参数输入。按 2 号梨形槽输入对应的参数。再次单击工程树中的 Slot（槽形），弹出如图 3.21 所示的界面。

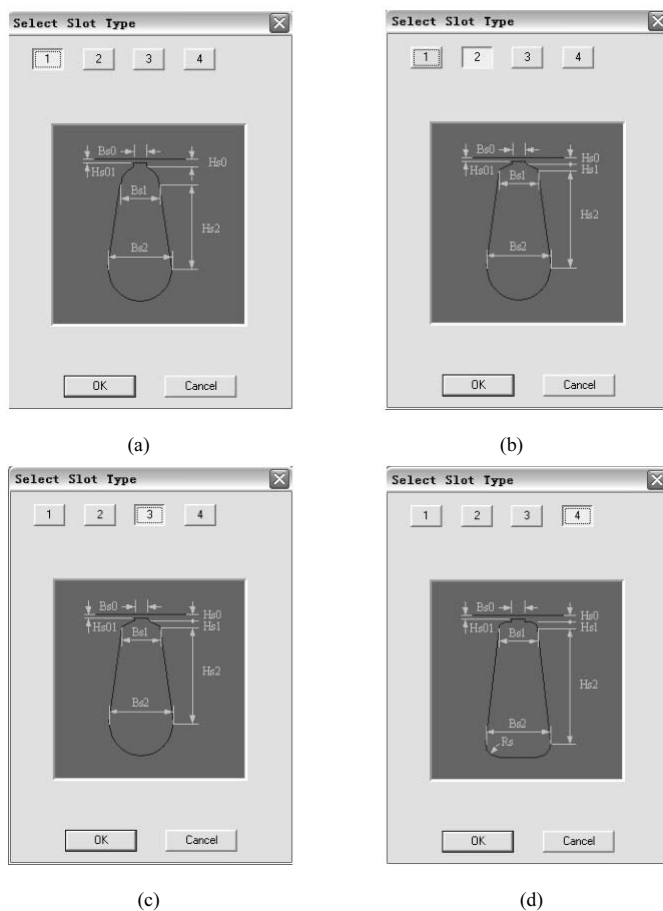


图 3.20 选择槽形对话框

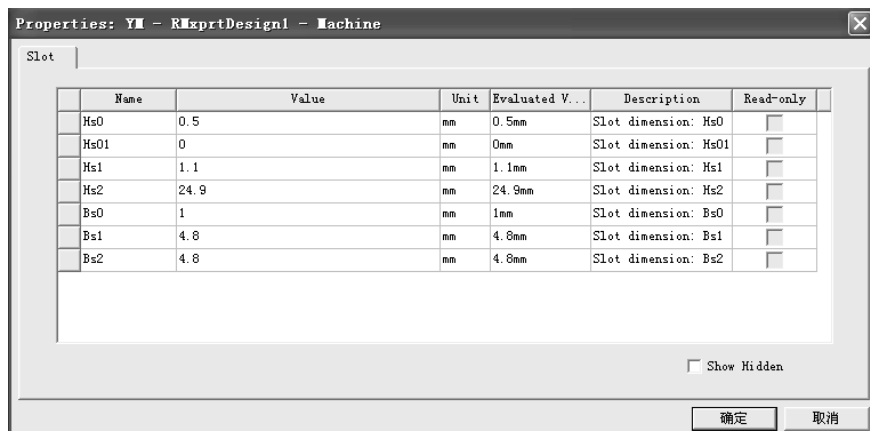


图 3.21 槽形参数选择对话框

在转子的 Slot (槽形) 设置中, 可以选转子闭口槽, 即  $Hs01 = 0$ 。输入其他槽形参数后, 单击“确定”按钮退出, 生成的转子铁心冲片模型如图 3.22 所示。

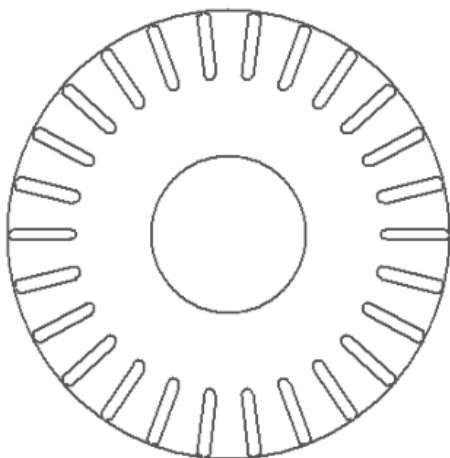


图 3.22 生成的转子铁心冲片模型

(4) 转子绕组参数设置。打开转子绕组设置对话框，如图 3.23 所示。

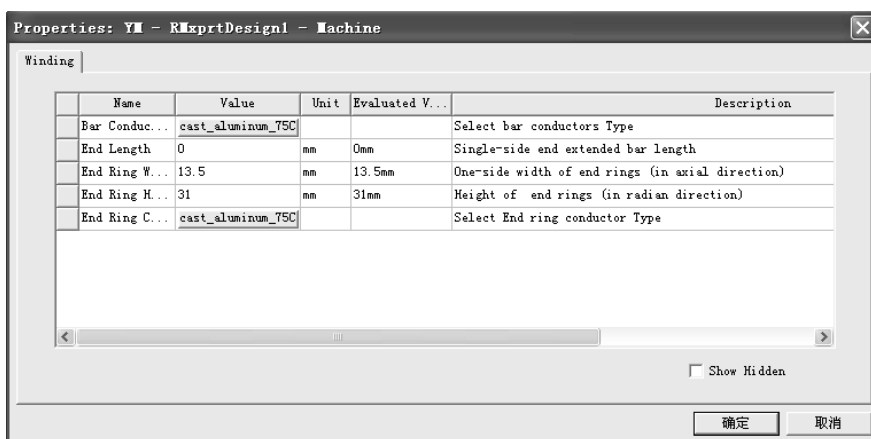


图 3.23 转子绕组设置对话框

图 3.23 中自上而下的鼠笼转子绕组参数及其说明，如表 3.6 所示。

表 3.6 绕组参数及其说明

绕组参数	说 明
Bar Conductor Type	转子鼠笼导条材料，与选择铁心材料类似，在 RMsprt 材料库中选择自带的 cast_aluminum_75
End Length	鼠笼导条高于转子端面的长度。在嵌入铜条作为鼠笼绕组时，铜条一般要高于转子端面，目的是方便焊接导条与端环。但在铸铝转子中，该项应为 0，因为铸铝端环紧挨着转子端面
End Ring Width	端环的轴向厚度，此处选 13.5mm
End Ring Height	端环的径向长度，此处选 31mm
End Ring Conductor Type	转子端环材料，对于样机，该材料与鼠笼导条材料一样，均为铸铝

### 3.1.5 转轴参数选定

单击 Shaft（转轴）选项，弹出如图 3.24 所示的转轴参数设置对话框。

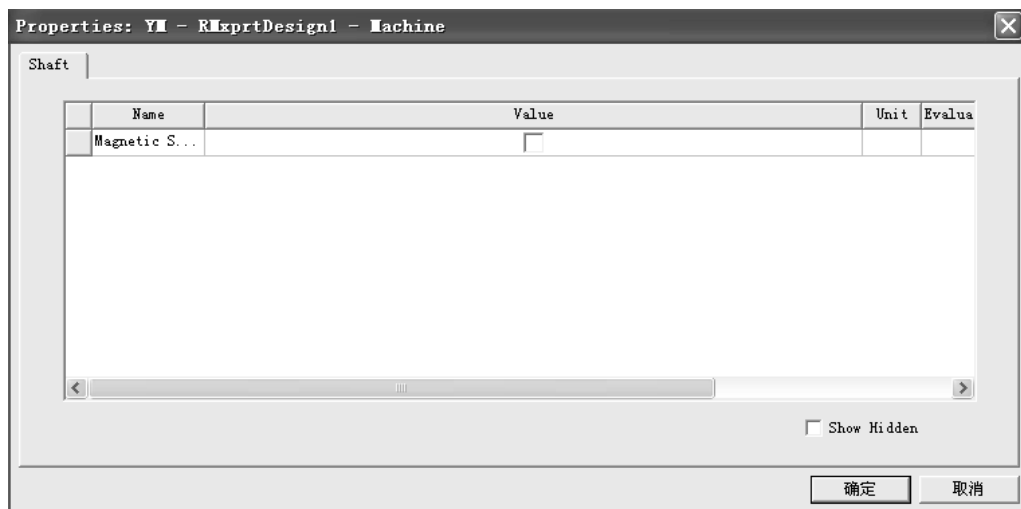


图 3.24 转轴参数设置对话框

图 3.24 中只有一个可选变量，本例选 45 号钢，即选择转轴材料为不导磁。

### 3.1.6 电动机仿真参数选定

上述步骤完成后，就选定了仿真发电机的所有参数，包括整体模型的参数、定子各部分的材料和尺寸、转子各部分的材料和尺寸、转轴的参数。下面输入额定参数，以便进行仿真分析。

如图 3.25 所示，单击 RMXprt→Analysis Setup→Add Solution Setup，打开如图 3.26 所示的参数输入界面，在该界面中输入发电机的额定值，如负载类型、额定功率、额定电压、额定转速和运行温度等，然后输入额定运行的频率和定子三相绕组的连接形式，再单击“确定”按钮退出。

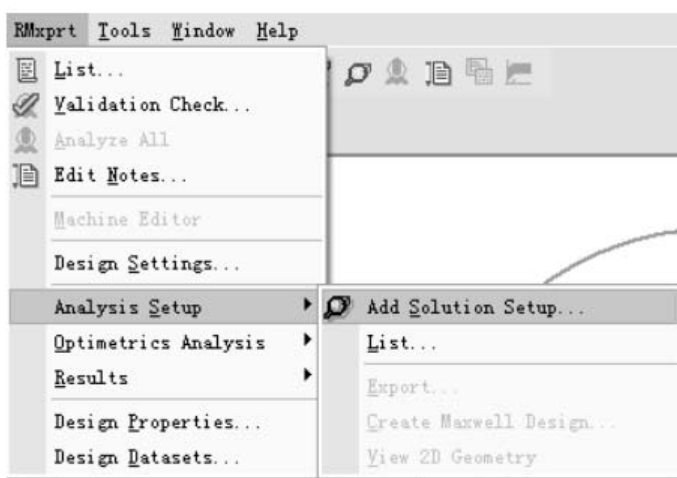


图 3.25 进入参数输入界面的步骤

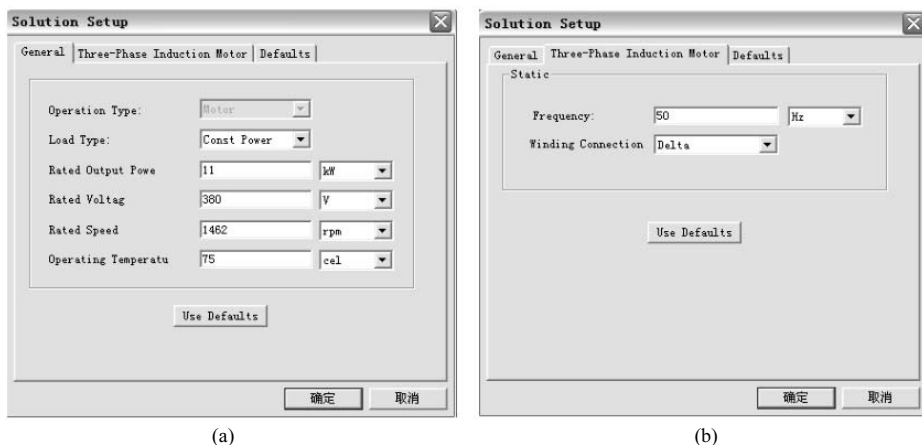


图 3.26 仿真参数设定界面



图 3.26 中参数的含义及其说明如表 3.7 所示。


表 3.7 参数的含义及其说明

参数的含义	说 明
Load Type (发电机的负载类型)	Const Power, 即恒功率负载形式。此外, 软件还有 Const Speed (恒转速负载)、Const Torque (恒转矩负载)、Linear Torque (线性转矩负载) 和 Fan Load (风扇类负载) 等常用负载形式供用户选择
Rated Output Power (电机的额定输出功率)	选择仿真的额定输出功率为 11kW
Rated Voltage (额定电压)	按照行业规定, 额定电压均指发电机的线电压, 在此输入 380V
Rated Speed (额定转速)	4 极发电机的同步转速为 1462rpm
Operating Temperature (工作温度)	电机为 B 级绝缘。为方便换算, 选择工作温度为 75℃。定子绕组和转子鼠笼电阻均按照 75℃时计算
Frequency (电源频率)	50Hz
Winding Connection (定子绕组的连接方式)	一种是 Delta, 即三角形连接方式; 另一种是 Wye, 即星形连接方式。按照样机的设计数据可知, 应选择 Delta 连接方式

至此, 就完成了 RMxpert 所需全部发电机参数的输入工作。

### 3.1.7 发电机的仿真运行

在对发电机模型进行有限元分析之前, 应利用软件的自动检测功能校验所生成的模型是否有效。具体操作过程如下: 单击工具栏上的  按钮, 出现如图 3.27 所示的有限元模型自动检测界面, 检测完毕后, 若各检测项前面都出现  符号, 则说明所检测的发电机模型合格。此时, 可对建立的模型进行仿真分析。自动检测结束后, 单击“关闭”按钮退出。

(1) 对通过检验的模型进行相应的求解计算。单击工具栏上的按钮 , 即可开始相应的分析运算。

(2) 运行结束后, 选择 Tools 下拉菜单中的 RMxpert→Results→Solution Data, 弹出如图 3.28 所示的计算结果界面。

在仿真结果中, 可以看到有限元静态分析的输出结果主要包括各类性能参数、设计表单和输出曲线三部分: 性能参数包括最大转矩点数据、堵转电流和堵转转矩等有限元仿真

数据的运算结果；设计表单包括转子参数等；性能曲线主要包括速度与输入相电流之间的关系曲线、速度与效率之间关系的曲线等。

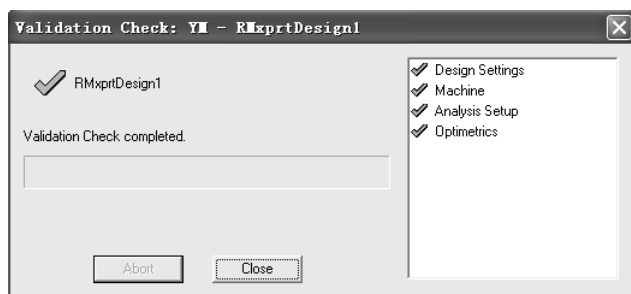


图 3.27 有限元模型自动检测界面

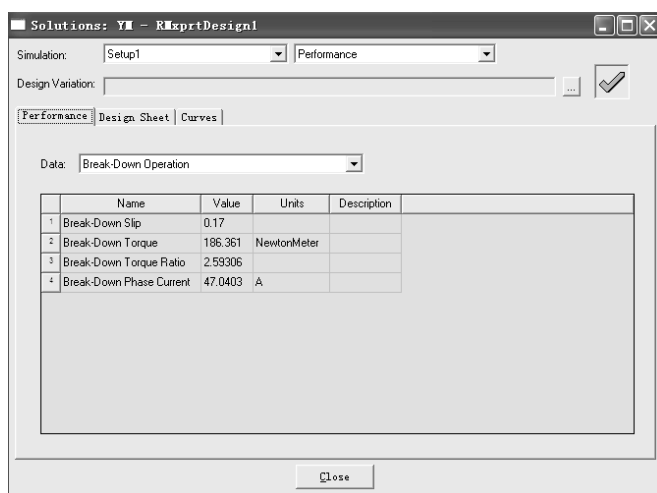
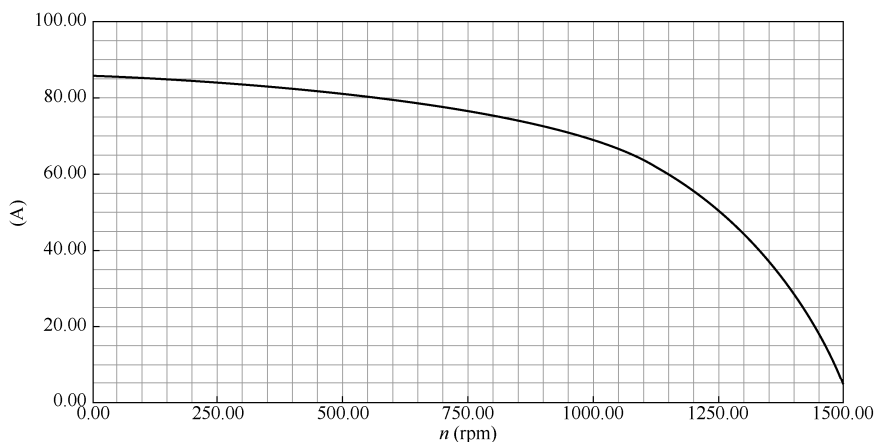


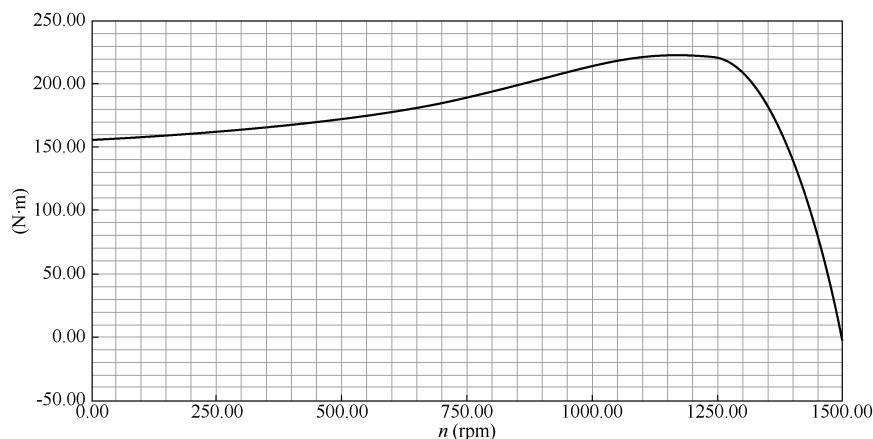
图 3.28 计算结果界面

(3) 打开曲线选项，生成发电机仿真的主要参数曲线，如图 3.29 所示。从图中可知从静止到稳定运行的启动过程中，发电机电流或转矩与转速之间的变化关系。



(a) 转速与相电流关系曲线

图 3.29 静态有限元计算得到的电机仿真波形曲线



(b) 转速和转矩波形变化曲线

图 3.29 静态有限元计算得到的电机波形仿真曲线 (续)

图 3.29 中给出了转速与相电流的关系曲线、转速与转矩的变化关系曲线。当然，也可方便地得到其他参数的关系曲线。

## 3.2 RMxpirt 和 Maxwell 2D 联合仿真

上面在 RMxpirt 环境下生成的发电机模型，可以一键导入 Ansoft 的 Maxwell 2D 环境，以便进行后续的有限元暂态分析和电磁场仿真计算。

### 3.2.1 RMxpirt 环境中发电机模型生成 2D 模型的操作

在 RMxpirt 环境下，选中并打开已创建好的发电机模型文件，初步检查和分析模型后，按照如下操作步骤，就可方便地得到相应的二维发电机模型。

Ansoft 有限元软件支持二维有限元模型的一键式生成，前提是已在 RMxpirt 环境下按照上述方法完成了发电机的参数设置。只要设置正确，单击相应的按钮后，仿真软件就会自动生成二维几何模型，选择相应的材料并添加激励源，因此大大简化了复杂发电机模型的绘制过程。

在生成的发电机界面中，如图 3.30 所示，选择 RMxpirt→Analysis Setup→Create Maxwell Design，打开如图 3.31 所示的界面。单击 OK 按钮，即可自动创建发电机二维动态模型。生成的新有限元模型的名称为 Maxwell Design1，如图 3.31 所示。要想手动完成二维有限元模型的创建，可取消对 Auto setup 选项的选取，然后单击 OK 按钮。

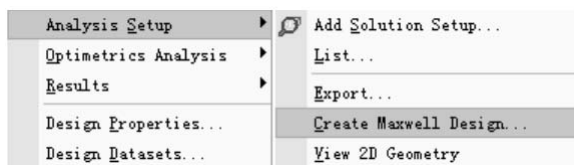


图 3.30 由 RMxpirt 自动生成二维操作



图 3.31 二维动态模型生成设置



软件经过一定时间的自动运行后，会生成相应的二维发电机仿真模型，利用该模型，即可对发电机进行相应的二维静态和动态电磁性能的仿真分析。图 3.32 显示了新生成的二维发电机计算模型。

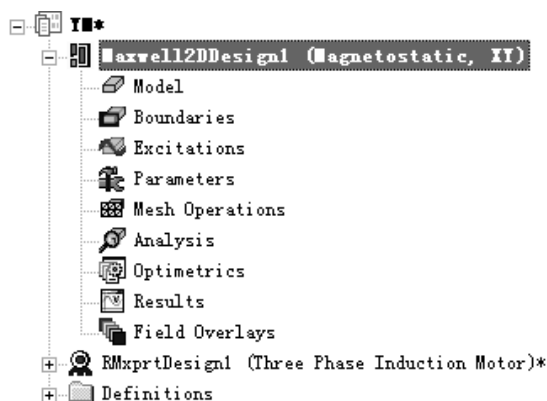


图 3.32 新生成的二维发电机计算模型

### 3.2.2 仿真运行曲线的输出

使用仿真软件可得到静态和动态电磁场模型，但通常我们更关心发电机的动态电磁场分布。因此，下面仅简要介绍动态输出。系统一键生成的二维动态模型的转速设置默认值是额定转速，不进行参数的额外修改时，得到的瞬态输出结果是额定状态的动态情况。发电机转子轴上的输出电磁转矩如图 3.33 所示，可以看出，经过短暂的启动过程，发电机转子电磁转矩基本等于负载转矩，达到了动态运行的平衡。发电机开始运行时，启动瞬间电磁转矩出现较大的负向阻力转矩。实际中运行中的发电机，从  $t = 0\text{s}$  开始逐步上升到额定速度。图 3.34 是对应额定运行状态时定子三相电流的变化波形。可以看出，启动过程中发电机的启动电流很大，启动过程结束后，发电机的定子三相电流维持在负载电流的三相对称状态。

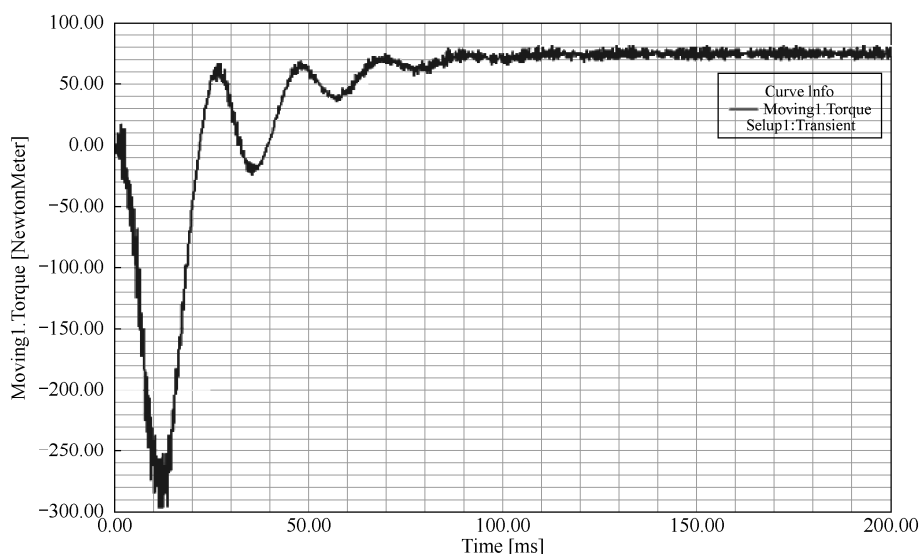


图 3.33 动态电磁转矩变化波形

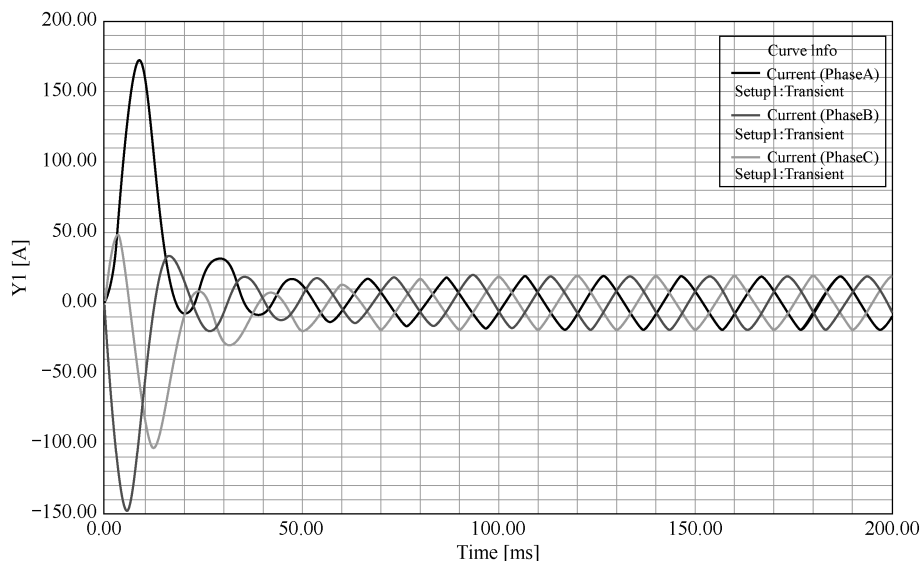


图 3.34 瞬态仿真输出三相电流变化波形

图 3.35 是仿真结束时刻  $t = 0.2s$ ，发电机内部磁力线和磁密的分布云图。要得到不同时刻发电机内部磁力线和磁密的分布云图，只需单击图 3.35 中左下方的时间框，并在弹出的界面中输入对应的时刻。

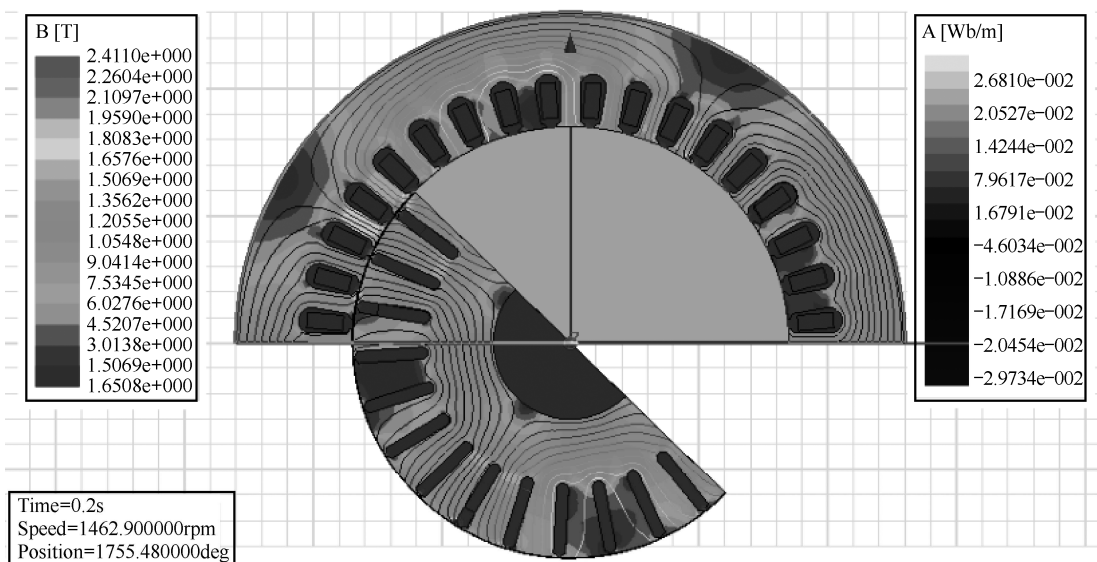


图 3.35 仿真结束时刻磁力线和磁密分布云图

在发电机二维瞬态磁场的计算中，开始时刻和计算步长值的设定，要根据具体的仿真准确度和发电机进入稳态过程所需要的时间综合考虑。例中仿真的开始时刻为  $t = 0s$ ，计算终止时刻为  $t = 0.2s$ ，计算时间步长是  $0.0002s$ ，可以看出发电机约在  $50ms$  时进入稳定运行状态。

上面介绍了发电机建模和仿真的分析方法，发电机的建模方法和电动机的操作过程基

本一致。发电机的建模方法可分为两种：第一种是在 CAD 软件中输入所有尺寸，然后生成发电机的模型，再导入 Ansoft 软件；第二种方法是直接在 Ansoft 软件中绘制发电机模型。模型生成后，发电机仿真设置与电动机仿真设置的不同之处在于，发电机转子旋转的速度要设置为大于同步旋转速度。

以上简要介绍了 Ansoft 有限元电磁场仿真软件在风力发电机设计中的运用。可以看出，风力发电机结构参数的设计可通过有限元的计算结果不断调整和优化，实现发电机的高效设计。由于发电机性能参数的确定在风力发电系统中至关重要，因此对风力发电机的设计非常有必要。

## 第4章 双馈风力发电系统及其仿真分析

今天，电力电子器件新技术的不断涌现、微处理器技术的日新月异，使得速度可变、频率恒定的风力发电机，特别是双馈风力发电机（DFIG），正在可再生能源发电领域逐渐成为主流发电机型。从结构上看，双馈风力发电机实际上是在转子上安放对称三相交流绕组的发电机，当满足一定的运行条件时，这种风力发电机既可向电网馈送电能，又可从电网吸收电能，即电网能量和发电机发出的电能实现了双向流动与交换，这就是“双馈”发电机的名称由来。双馈发电机转子的旋转正常时，速度要比同步速稍小，故其本质上仍然是异步发电机。转子上的三相绕组参与发电机的励磁过程，这与普通同步发电机的励磁过程类似，因此双馈发电机在有些场合也称交流励磁异步发电机。

依据风力发电系统并网时的频率和速度两项指标，风力发电机组主要分为两大类：一类是速度和频率不变的发电系统，又称恒速恒频（Constant Speed Constant Frequency, CSCF）风力发电系统；另一类是速度变化但频率不变发电系统，又称变速恒频（Variable Speed Constant Frequency, VSCF）风力发电系统。这两类发电系统并网运行时，都要求在频率不变的情况下运行。其中 CSCF 发电系统是指发电机转速  $n$  不变时，由  $n = 60f/p$  可以看出风力发电机组输出的电能频率与电网频率始终保持相同。

VSCF 风力发电系统的优点是，单机容量不是很大，不需要电力电子转换设备，整体结构相对简单。CSCF 风力发电系统的缺点是，当风速变化时，风能的利用系数不会一直保证在最优状态，因此无法最大限度地利用风能。另外，由于风速是不断随机变化的，风能跃升时，增加的风能会通过风力系统的机械传输机构传递给主轴和齿轮传动机构等部件，在机械部件上产生很大的机械应力，因此在设计时必须增加安全系数，而这样做会使发电机组的整体重量加大，进而导致制造成本增加。CSCF 风力发电系统通常采取定桨距失速方法来运行。这种系统的发电机类型以三相异步发电机居多，为高效运行，通常需要对其进行无功补偿。

典型的并网型 CSCF 风力发电系统如图 4.1 所示。这是 20 世纪八九十年代的主流风力发电系统的拓扑结构，其系统结构与运行控制相对简单，运行性能可靠，装机容量从几十千瓦到几兆瓦不等。

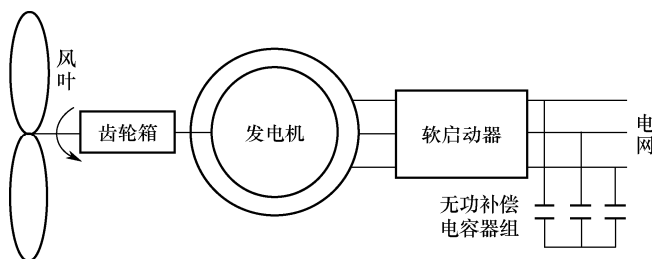


图 4.1 并网型 CSCF 风力发电系统

风能利用系数通常用符号  $C_p$  表示，它说明风力机从风力中获得多少能量。 $C_p$  与风力发

电系统中风速的大小、风轮转速变化和桨距角有关。由于风速是随机变化的,当以上三个参数发生变化时, $C_p$ 值就会随之发生变化,风力机的运行工况尤其是效率就会发生变动。

风能是可再生能源,其显著特点是具有随机性和不稳定性,采用 CSCF 发电方式时,风力机只有运行在某一转速时才能获得理想的运行效率,而当风速受外界环境的影响发生改变时,运行效率就会受到影响而偏离最佳效率,进而导致风力资源的浪费,同时加大风力系统机械的应力磨损。

VSCF 发电系统是指当风速变化时,为获得最大的电能输出,发电机的转速会相应地调整,通过电力电子设备实现频率恒定的电能输出。采用 VSCF 风力发电系统时,若风速出现变化,则风力系统就会调节风轮机的转速,在捕捉最大风能的前提下,让风机始终保持对应风速的最佳转速,从而最大限度地利用风能资源,进而改善风力发电转化的利用率。此外,VSCF 风力发电系统与电网能够以多种方式连接,因此对电网的运行影响较小。

以下主要以双馈风力发电系统为例,阐述其基本原理和结构,并对其并网运行进行仿真分析。

## 4.1 双馈风力发电系统的主要结构部件和运行原理

### 4.1.1 风力发电中 PWM 的相关技术规定

在风力发电系统内部,双馈风力发电机一般通过电力电子器件来进行能量的双向流动控制,即使用双 PWM (Pulse Width Modulation, 脉冲宽度调制) 型励磁变换器为绕线转子提供三相励磁。双馈风力发电机并网和状态的改变,要通过变换器的调节作用来实现,在发电机转子上安装速度检测反馈装置,依据速度的变化来决定应采用哪种调节方法,一般可以改变转子电流的频率来实现变速恒频电能的输出。可以说,转子三相 PWM 励磁变换器是保证双馈风力发电系统实现变速恒频运行的关键。

在双馈风力发电系统中,发电系统对双 PWM 型励磁变换器的技术规定如下:①作为转子励磁的 PWM,要具有实现发电机和电网之间能量自由交换的功能,这是对 PWM 最基本的技术要求。发电机转子转速小于旋转磁场转速时,发电机运行在电动机状态,吸收电网中的电能;反之,发电机作为发电运行状态向电网输送电能。可以看出,为双馈发电机的转子提供励磁,需要具备此项功能。②因为转子侧利用双 PWM 变换器励磁,其运行必定会导致转子中出现高次谐波分量,更为严重的是,这种高次谐波会被发电机传递,并在此过程中增大谐波对发电机性能的危害,最终影响发电机产生的电能质量。因此,必须设法改变电力电子器件 PWM 的非线性,尽量减少转子侧非线性高次谐波的产生。另外,双 PWM 变换器本身也是一种非线性器件,会对电网产生谐波干扰,因此选择和设计时必须改善 PWM 的非线性特征。③转子励磁变换器能够提高相应的无功功率。首先,双 PWM 变换器要尽量少地吸收电网系统的无功功率;其次,双馈发电机的转子侧变换器能够从电网系统吸收一定的无功功率,在转子侧吸收的无功功率变大时,双 PWM 变换器要具有满足发出一定容量无功功率的能力。

综上所述,双 PWM 型励磁变换器的特点如下。

(1) 双 PWM 型励磁变换器由功能相对独立的两个背靠背的 PWM 变换器组成:一个靠近发电机转子侧,通常称为转子侧变换器(RSC);另一个靠近电网侧,通常称为网侧变换

器（GSC）。GSC 能够帮助改善交流侧输入功率的因数，最重要的是，它还可以保持直流环节电压波动最小，因此有利于 RSC 和系统的正常运行。RSC 的重要作用在于，在转子侧对发电机采用相量控制，保证双馈发电机解耦的有功功率和无功功率正常输出。RSC 和 GSC 这两个 PWM 器件可以采取相对独立的调节环节，协调实现各自的作用，如图 4.2 所示。

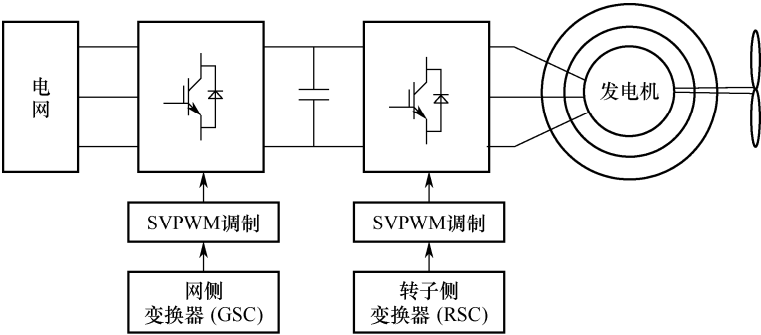


图 4.2 双 PWM 型变换器的控制方法

双 PWM 励磁变换器的两个背靠背变换器的运行状态，能在整流和逆变状态下实现能量的双向流动。

(2) 风力发电用的同步发电机一般都是在绕组中通入直流电来励磁的，这就决定了这种发电机中可以人为调节的控制量只能是电流峰值。很明显，这种发电机在发电过程中可以实现系统无功调节的作用。与同步发电机不同，双馈风力发电机的可控参数有 3 个，即交流励磁电流最大值、电流的频率和相位，这表明双馈风力发电机与同步发电机相比控制方式更加灵活多样。

(3) 调节转子绕组中励磁电流的频率，可以改变发电机转子的转速，进而实现风能的最大追踪。可见，风速或发电机负载受到扰动时，能够及时改变频率，从而实现调节转子速度的目的，进而最大化地吸收来自转子的能量，释放或吸收负荷发出的能量，减小电网系统受到的影响。

(4) 调节注入转子中的电流相位角，会改变转子中磁场的空间相位。此时，发电机定子磁场和转子磁场的相对位置发生变化，即风力发电机本身的功率角发生移动，从而通过调整电流相位来达到调节发电机功率的目的。

(5) 调整转子电流相位的最大好处在于，可以分别实现有功和无功的调节，且调节互相独立，因此体现了双馈发电机控制方式的灵活多变性。在双馈发电机控制方式上，采用交流相量控制原理，分别调整发电机转子侧绕组中的电流大小和相位关系角，就能实现独立调节输出有功和无功的目的。

双馈风力发电机具有通过调节转子转速来实现速度变化但保持频率不变的性质，其运行特点如表 4.1 所示。

表 4.1 双馈风力发电机具有的变速恒频特点

双馈风力发电机运行特点	说 明
发电整体效果好	随着发电机转子转速的不断变化，DFIG 相应地调节转子励磁电流的幅值、频率与相位，进而一直使发电机处于风能的最大转化状态

(续表)

双馈风力发电机运行特点	说 明
有助于电网安全高效运行	电网运行时经常会出现多余的无功,调节转子电流的相位角大小,可以改变发电机的功率角,进而就地吸收系统中暂时过多的无功,减小无功的流动,同时稳定电网中的电压,减小电压波动的幅值
能够实现电力系统和发电机的协调并网控制	转子励磁的调节有助于发电机并网运行的安全和稳定

从表 4.1 可知,双馈风力发电机的优点较多,因此由其构成的风力发电系统在未来的发电领域有很大的发展潜力。

双馈风力发电机之所以具有上述特点,原因是其转子三相绕组的电流可以独立控制。然而,转子侧的励磁电流的理想控制效果实现起来相对复杂,因此下面的内容主要围绕转子侧励磁电流的控制策略这个关键问题来阐述交流理论中的核心思想,即相量控制原理在风力发电领域的应用,主要介绍定子磁链定向的相量理论,这种方法在实现双馈发电机的有效控制过程中,对发电机的有功和无功效果都很理想,且实现起来较为方便,因此得到了普遍运用。

#### 4.1.2 双馈风力发电机运行原理

双馈风力发电机和普通三相异步发电机的结构相似,其定子和转子绕组都是对称的三相绕组。假设发电机的极对数是  $p$ ,可知当定子绕组通电时,会在发电机内部产生不断变化的旋转磁场。设理想同步转速为  $n_0$ ,它与定子频率  $f_1$  和发电机极对数  $p$  之间的关系为

$$n_0 = \frac{60f_1}{p} \quad (4.1)$$

假设通入转子的电流的频率是  $f_2$ ,此时发电机内部也会产生旋转磁场,这个磁场对转子的相对速度用  $n_2$  来表示,它们之间的关系为

$$n_2 = \frac{60f_2}{p} \quad (4.2)$$

由式(4.2)可知,若能够改变  $f_2$ ,则转速  $n_2$  就会得到调节,改变转子三相电流任意两相的接线,会使转子旋转磁场反向。设  $n$  为转子的机械转速,可知,若保持  $n \pm n_2 = n_0$  为一个不变值,如式(4.3)所示,则发电机定子绕组输出到电网的电能的频率始终保持为恒定值  $f_1$ :

$$n \pm n_2 = n_0 \quad (4.3)$$

若双馈风力发电机的转差率为  $s = (n_0 - n_2) / n_0$ ,则在转子中应使得电流频率与定子电流频率之间的关系满足

$$f_1 = \frac{pn_m}{60} \pm f_2 \quad (4.4)$$

由式(4.4)可知,为消除转子转速由于风速的随机变动而导致的频繁波动现象,应通过调节转子频率  $f_2$  来加以控制,进而在双馈风力发电机的定子侧保证转子频率  $f_1$  不变。因此,改变转子绕组中电流的频率,可实现恒频电能的输出。

综上所述,双馈风力发电机能够在表 4.2 所示的三种状态下运行。

表 4.2 双馈风力发电机的运行状态及其说明

运行状态	说 明
亚同步运行	满足 $n < n_0$ ，能保证 $n + n_2 = n_0$
超同步运行	$n > n_0$ ，通过调节可以实现 $n - n_2 = n_0$
同步运行	$n = n_0$ ，转子不感应频率

用等效电路来研究双馈风力发电机运行时，为方便理解，通常忽略如下因素：

- (1) 只考虑发电机定子、转子的磁势基波分量，非线性谐波视为 0。
- (2) 只考虑定子、转子在空间形成的旋转磁场中的磁势的基波分量，忽略高次分量。
- (3) 铁心叠片磁滞和涡流等的铁损耗为 0。
- (4) 采用的变频电源能够为转子提供合适的电流和电压，认为其他辅助设备无损耗。

风力发电机定子绕组中电压和电流的正方向遵从发电机的惯例规定，转子绕组中电压和电流的正方向遵从电动机的惯例规定。由上述分析得到双馈风力发电机的等效电路如图 4.3 所示。

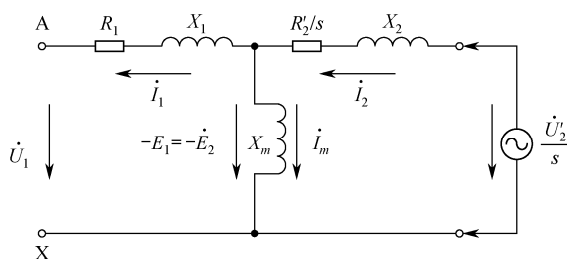


图 4.3 双馈风力发电机的等效电路

根据图 4.3，可得双馈风力发电机各电量的关系如下：

$$\begin{cases} \dot{U}_1 = -\dot{E}_1 - \dot{I}_1(R_1 + jX_1) \\ \frac{\dot{U}_2'}{s} = -\dot{E}_2' + \dot{I}_2'\left(\frac{R_2'}{s} + jX_2'\right) \\ \dot{E}_1 = \dot{E}_2' = -\dot{I}_m(jX_m) \\ \dot{I}_1 = \dot{I}_2' - \dot{I}_m \end{cases} \quad (4.5)$$

式中， $R_1$  和  $X_1$  分别是定子绕组的电阻分量和漏抗分量， $R_2'$  和  $X_2'$  分别是转子绕组归算后的电阻分量和漏抗分量， $X_m$  是电抗分量， $\dot{U}_1$ 、 $\dot{E}_1$  和  $\dot{I}_1$  分别是定子侧电压、感应电势和电流相量， $\dot{E}_2'$  是转子侧感应电势， $\dot{I}_2'$  是转子电流的归算值， $\dot{U}_2'$  是转子电压的归算值， $\dot{U}_2'/s$  是  $\dot{U}_2'$  的归算值。

常规转子绕组通路时的发电机等效电路如图 4.4 所示。



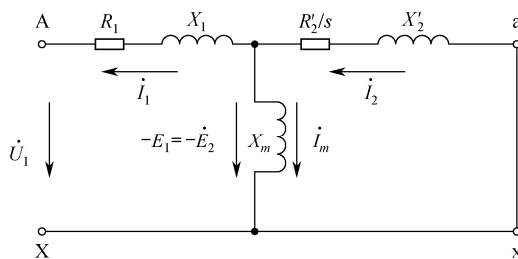


图 4.4 常规转子绕组结构的发电机等效电路

容易得到, 常规转子绕组结构发电机的基本方程为

$$\begin{cases} \dot{U}_1 = -\dot{E}_1 - \dot{I}_1(R_1 + jX_1) \\ \dot{E}_2' = \dot{I}_2' \left( \frac{R_2'}{s} + jX_2' \right) \\ \dot{E}_1 = \dot{E}_2' = -\dot{I}_m(jX_m) \\ \dot{I}_1 = \dot{I}_2' - \dot{I}_m \end{cases} \quad (4.6)$$

从等效电路和基本方程可知, 双馈风力发电机本质上是常规绕线式发电机, 其特别之处是转子三相绕组能够施加可调节的交流三相电源, 从而使双馈风力发电机的性能产生很大的变化, 因此双馈风力发电机的特点和性能更加优越。下面通过发电机相量图, 介绍外加交流励磁电源来改善双馈风力发电机有功功率和无功功率的原理。

图 4.5 显示了转子中加入励磁电源前的相量图, 图 4.6 显示了转子中加入励磁电源后的相量图。从相量图中可以看出, 对于常规的绕线式转子发电机, 当运行的转差率  $s$  和转子参数确定后, 就确定了定子、转子各相量相互之间的相位, 而无法进行调整, 即当转子的转速超过同步转速后, 运行于发电机状态, 此时虽然发电机向电网输送有功功率, 但同时仍然要从电网中吸收滞后的无功进行励磁。但从图 4.6 中可以看出, 引入转子励磁后, 定子电压和电流的相位发生变化, 因此可以调整双馈发电机的功率因数, 这样就大大改善了双馈发电机的运行特性, 对电力系统的安全运行有重要意义。

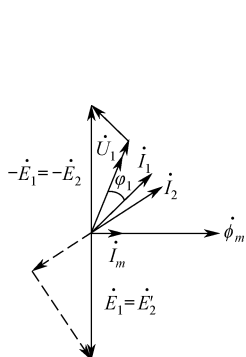


图 4.5 转子中加入励磁电源前的相量图

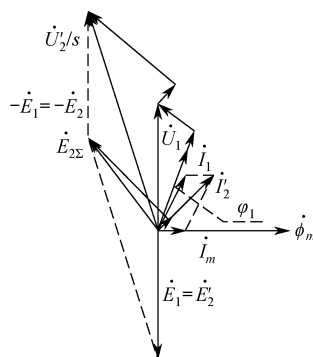


图 4.6 转子中加入励磁电源后的相量图

### 4.1.3 双馈风力发电机的功率关系

若风轮机的输出功率为  $P_{\text{mech}}$ , 则发电机定子输出的电磁功率为  $P_1$ , 二者之比为  $P_2$ ,  $s$  是转差率。  $s > 0$  或  $s < 0$  时, 转差功率和定子产生的电功率的关系为

$$P_2 = |s|P_1$$

若  $P_2$  是转子吸收的电磁功率，则有

$$P_2 = sP_1$$

若  $s > 0$ ，则  $P_2 > 0$ ，转子的速度要比发电机的同步转速大，此时的功率流向如图 4.7 和图 4.8 所示。

### 1. 超同步运行

在这种运行状态下，转子的速度要比发电机的同步转速大，此时的功率流向如图 4.7 和图 4.8 所示。

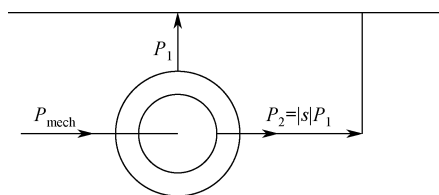


图 4.7 超同步状态运行时双馈风力发电机的功率流向

由图中的功率流向可知，发电机注入功率和输出功率恒等：

$$P_{\text{mech}} = P_1 + |s|P_1 = (1 + |s|)P_1$$

因为发电机超同步运行，故  $s < 0$ ，易知

$$P_{\text{mech}} = (1 - s)P_1$$

因此，处于超同步运行状态时，转差率  $s < 0$ ，发电机得到的机械功率  $P_{\text{mech}} > P_1$ 。

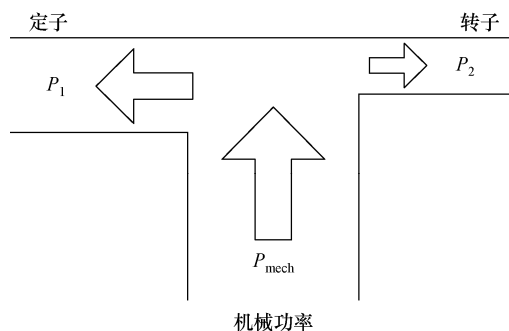


图 4.8 超同步状态运行时双馈风力发电机的功率流向

### 2. 亚同步运行

此时转子运行的速度明显要比理想空载的转速低，因此称为亚同步运行。亚同步状态运行时的功率关系如图 4.9 所示。

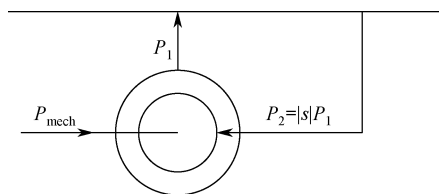


图 4.9 亚同步状态运行时的功率关系

由图 4.9 可知，以下等式成立：

$$P_{\text{mech}} + |s|P_1 = P_1$$

此时，风力发电机的转差率  $s > 0$ ，有

$$P_{\text{mech}} = (1-s)P_1$$

综上，处于亚同步运行状态时，转差率  $s > 0$ ， $P_{\text{mech}} < P_2$ 。

## 4.2 双馈风力发电机的数学模型

### 4.2.1 双馈风力发电机三相静止坐标系下的数学模型

要有效地控制风力发电系统，必须建立控制系统的数学模型。通常，双馈风力发电机的数学模型可在不同坐标系中表示为不同的形式。为便于详细介绍控制策略，这里首先在定子、转子三相静止  $ABC$  坐标系下建立发电机本体的数学模型，接着采用相应的数学坐标变换，获得有利于控制策略实现的风力发电机在两相坐标系中的简化模型，进而研究相应的控制算法。

分析双馈风力发电机的建模问题时，须在统一各电量参数的参考方向的前提下进行，这里首先选定正方向。本章采用如下方向：定子侧参数的正方向遵从发电机的规定，转子侧参数的正方向遵从电动机的规定。

推导简化数学模型时，假设：①发电机各相绕组不存在非对称；②磁路不存在非线性；③铁心未进入饱和状态；④铁心无齿槽；⑤磁性材料无损耗。此时得到的双馈风力发电机的三相坐标系模型如图 4.10 所示，定子、转子上均装有三相对称分布的绕组。从图中可以看出，转子起始角  $\theta_r$  的大小由定子 A 相轴线和转子 a 相轴线决定。

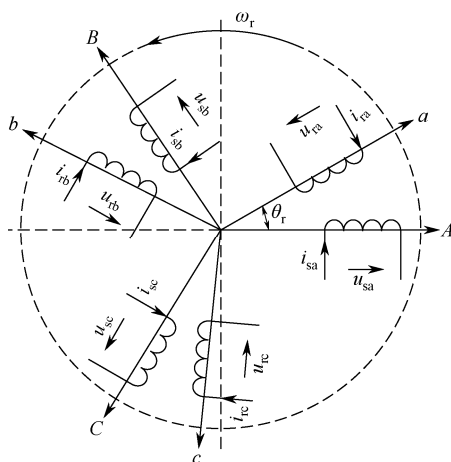


图 4.10 双馈风力发电机三相坐标系模型

双馈风力发电机的基本电磁关系可写为

$$u = Ri + p\psi \quad (4.7)$$

式中，

$$\begin{aligned} \mathbf{u} &= [u_{sa} \quad u_{sb} \quad u_{sc} \quad u_{ra} \quad u_{rb} \quad u_{rc}]^T \\ \mathbf{R} &= \text{diag}[r_s \quad r_s \quad r_s \quad r_r \quad r_r \quad r_r] \\ \mathbf{i} &= [i_{sa} \quad i_{sb} \quad i_{sc} \quad i_{ra} \quad i_{rb} \quad i_{rc}]^T \\ \boldsymbol{\psi} &= [\psi_{sa} \quad \psi_{sb} \quad \psi_{sc} \quad \psi_{ra} \quad \psi_{rb} \quad \psi_{rc}]^T \end{aligned}$$

其中,  $u_s$  和  $u_r$  分别是定子和转子的三相电压,  $i_s$  和  $i_r$  分别是定子和转子的三相电流,  $r_s$  与  $r_r$  分别是定子和转子的每相电阻,  $\psi_s$  和  $\psi_r$  分别是定子和转子的三相磁链。上述物理量均是折算值。 $p$  为微分算子, 表达式为  $p = d/dt$ 。

双馈风力发电机的磁链方程为

$$\boldsymbol{\psi} = \mathbf{L} \mathbf{i} \quad (4.8)$$

易知物理量  $\psi_{saf}$ 、 $\psi_{sbf}$ 、 $\psi_{scf}$  和  $\psi_{raf}$ 、 $\psi_{rbf}$ 、 $\psi_{rcf}$  的合成磁势大小相同, 是恒定的。其中  $\mathbf{L}$  是双馈风力发电机的电感矩阵, 表达式为

$$\mathbf{L} = \begin{bmatrix} L_{ss} & L_{sr} \\ L_{rs} & L_{rr} \end{bmatrix} \quad (4.9)$$

式中,  $L_{ss}$  为定子侧绕组的自感和互感,

$$\mathbf{L}_{ss} = \begin{bmatrix} L_{as} & M_{abs} & M_{acs} \\ M_{bas} & L_{bs} & M_{bcs} \\ M_{cas} & M_{cbs} & L_{cs} \end{bmatrix} \quad (4.10)$$

因为对称, 各绕组的自感和互感相等, 电感矩阵为

$$\begin{cases} L_s = L_{ms} + L_{os} \\ M_s = -\frac{1}{2} L_{ms} \end{cases} \quad (4.11)$$

式中,  $L_{ms}$  为定子主电感,  $L_{os}$  为定子漏电感。

得到的转子电感矩阵  $\mathbf{L}_{rr}$  为

$$\mathbf{L}_{rr} = \begin{bmatrix} L_{mr} + L_{or} & -\frac{1}{2} L_{mr} & -\frac{1}{2} L_{mr} \\ -\frac{1}{2} L_{mr} & L_{mr} + L_{or} & -\frac{1}{2} L_{mr} \\ -\frac{1}{2} L_{mr} & -\frac{1}{2} L_{mr} & L_{mr} + L_{or} \end{bmatrix} \quad (4.12)$$

式中,  $L_{mr}$  是转子主电感,  $L_{or}$  是转子漏电感。

定子主电感磁链与定子、转子都铰链, 归算后, 由于定子、转子三相对称绕组的匝数相同, 所以定子、转子三相对称绕组的主电感大小也相同, 有  $L_{ms} = L_{mr}$ 。

$L_{sr}$  和  $L_{rs}$  是定子、转子三相对称绕组之间的互感, 由于转子是不断旋转的, 所以互感与定子、转子的相对位置有关, 具体可表示为

$$\mathbf{L}_{sr} = \mathbf{L}_{rs}^T = \mathbf{L}_{ms} \begin{bmatrix} \cos \theta_r & \cos(\theta_r - 120^\circ) & \cos(\theta_r + 120^\circ) \\ \cos(\theta_r + 120^\circ) & \cos \theta_r & \cos(\theta_r - 120^\circ) \\ \cos(\theta_r - 120^\circ) & \cos(\theta_r + 120^\circ) & \cos \theta_r \end{bmatrix} \quad (4.13)$$

式中,  $\theta_r$  为转子位置角, 如图 4.10 所示。可以看出, 定子和转子三相对称绕组之间的互感矩阵不再是一个常数矩阵, 这就使得基于三相坐标系的发电机数学模型相对复杂, 不利于发电机控制方法的研究, 因此要通过相应坐标变换来简化电感矩阵。

双馈风力发电机的电磁转矩方程为

$$T_e = \frac{1}{2} \mathbf{i}^T \frac{\partial \mathbf{L}}{\partial \theta} \mathbf{i} \quad (4.14)$$

式中,  $\theta$  是转子机械角度, 此时有

$$T_e = -p \mathbf{i}_{abcs}^T \frac{\partial \mathbf{L}_{sr}}{\partial \theta_r} \mathbf{i}_{abcr} \quad (4.15)$$

式中,  $p$  是极对数,  $T_e$  是电磁转矩。  $\mathbf{i}_{abcs}$  与  $\mathbf{i}_{abcr}$  分别是定子、转子电流。风力发电系统转矩关系为

$$T_e - T_L = J \frac{d\Omega}{dt} \quad (4.16)$$

式中,  $T_L$  是负载转矩,  $J$  是转动惯量,  $\Omega$  是转子机械角速度, 对应的关系为

$$\omega_r = p\Omega \quad (4.17)$$

由上述分析可知, 在三相坐标系中, 双馈风力发电机的电气物理方程较为复杂, 只有对其进行一定的简化处理, 才便于分析发电机的性能。经过坐标变换来简化双馈风力发电机的数学模型是一种常用的方法。

## 4.2.2 双馈风力发电机数学模型的坐标变换

$dq$  坐标系在双馈风力发电机建模和控制的研究中被人们广泛采用,  $dq$  轴的旋转速度一般与旋转磁场的速度相同。

双馈风力发电机内部的气隙磁场由两部分组成, 即定子磁场和转子磁场。双馈风力发电机定子、转子的磁链向量如图 4.11 所示。图中,  $\psi_r$  是转子产生的磁链,  $\psi_s$  是定子产生的磁链。定子、转子磁链之间的夹角为  $\alpha$ 。

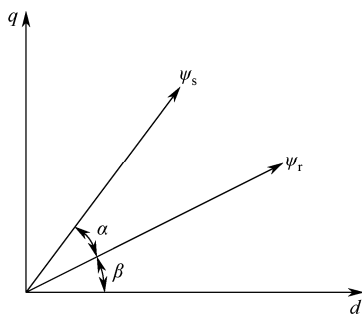


图 4.11 双馈风力发电机定子、转子磁链向量关系

定子、转子磁链方程为

$$\begin{cases} \psi_{ds} = -L_s i_{ds} + L_m i_{dr} \\ \psi_{qs} = -L_s i_{qs} + L_m i_{qr} \\ \psi_{dr} = -L_m i_{ds} + L_r i_{dr} \\ \psi_{qr} = -L_m i_{qs} + L_r i_{qr} \end{cases} \quad (4.18)$$

定子、转子电压关系为

$$\begin{cases} u_{ds} = p\psi_{ds} - \omega_l \psi_{qs} - R_s i_{ds} \\ u_{qs} = p\psi_{qs} + \omega_l \psi_{ds} - R_s i_{qs} \\ u_{dr} = p\psi_{dr} - \omega_s \psi_{qr} + R_r i_{dr} \\ u_{qr} = p\psi_{qr} + \omega_s \psi_{dr} + R_r i_{qr} \end{cases} \quad (4.19)$$

式中,  $\omega_l$  是理想同步角速度,  $\omega_r$  是转子角速度,  $\omega_s = \omega_l - \omega_r$  是同步速与转子角速度之差, 即转差角速度。

双馈风力发电机定子转矩  $T_s$  和转子转矩  $T_r$  为

$$T_s = \frac{3}{2} p (i_{ds} \psi_{qs} - i_{qs} \psi_{ds}) \quad (4.20)$$

$$T_r = \frac{3}{2} p (i_{dr} \psi_{qr} - i_{qr} \psi_{dr}) \quad (4.21)$$

双馈风力发电机机械平衡运动方程为

$$J_R \frac{d\Omega_R}{dt} = T_L - T_R \quad (4.22)$$

式中,  $T_L$  是负载转矩,  $J$  是机械的转动惯量,  $\Omega$  是运动的角速度。

从以上分析可知, 在两相旋转坐标系中, 双馈风力发电机的方程得到了简化。

#### 4.2.3 双馈风力发电机在任意转速坐标系中的模型

两相坐标系是任意转速坐标系的一种特殊情形。在任意转速坐标系中研究常用坐标的变化, 在发电机控制策略的使用和实践方面实用性很强。

发电机转子的角速度是  $\omega$ , 其  $d$  轴和定子 A 相轴线之间的夹角是  $\theta_s$ ,  $d$  轴和转子 a 相轴线之间的夹角是  $\theta_r$ :

$$\begin{cases} \theta_s = \int \omega(t) dt + \theta_{s0} \\ \theta_r = \int (\omega(t) - \omega_r(t)) dt + \theta_{r0} \end{cases} \quad (4.23)$$

式中,  $\theta_{s0}$  是  $d$  轴和定子 A 相的初始角度差,  $\theta_{r0}$  是  $d$  轴和转子 a 相绕组轴线在起始时刻的夹角。它们的差值  $\theta_r$  即  $\theta_r = \theta_{s0} - \theta_{r0}$ ,  $\theta_r$  与选取的转子在零时刻的位置有关。

显然, 常用的工程坐标变换都是在满秩情况下进行的, 在发电机的研究中, 最为常见的坐标变换有两种: 线性变换前后能够保证相量幅值不发生变化的变换, 线性变换前后功率保持不变的变换。这两种变换的本质作用都是将发电机或控制系统进行一定的简化。

从三相静止坐标系变换为任意转速坐标系的数学表达式为

$$C_{ABC/dq} = \begin{bmatrix} \cos \theta_s & \cos(\theta_s - 120^\circ) & \cos(\theta_s + 120^\circ) \\ -\sin \theta_s & -\sin(\theta_s - 120^\circ) & -\sin(\theta_s + 120^\circ) \end{bmatrix} \quad (4.24)$$

$$C_{abc/dq} = \begin{bmatrix} \cos \theta_r & \cos(\theta_r - 120^\circ) & \cos(\theta_r + 120^\circ) \\ -\sin \theta_r & -\sin(\theta_r - 120^\circ) & -\sin(\theta_r + 120^\circ) \end{bmatrix} \quad (4.25)$$

采用一定的数学变换, 可把三相静止坐标系中的变量, 等效为任意转速旋转坐标系中的参数。因此, 在任意转速坐标系下, 双馈风力发电机的电压方程可写为

$$\begin{cases} u_{ds} = r_s i_{ds} + p\psi_{ds} - \omega\psi_{qs} \\ u_{qs} = r_s i_{qs} + p\psi_{qs} - \omega\psi_{ds} \\ u_{dr} = r_r i_{dr} + p\psi_{dr} - (\omega - \omega_r)\psi_{qr} \\ u_{qr} = r_r i_{qr} + p\psi_{qr} - (\omega - \omega_r)\psi_{dr} \end{cases} \quad (4.26)$$

式中,  $ds$  是定子  $d$  轴的方向参数,  $qs$  是定子  $q$  轴的方向参数,  $dr$  是转子  $d$  轴的方向参数,  $qr$  是转子  $q$  轴的方向参数。磁链方程为

$$\begin{cases} \psi_{ds} = L_s i_{ds} + L_m i_{qs} + \psi_{dsf} \\ \psi_{qs} = L_s i_{qs} + L_m i_{ds} + \psi_{qsf} \\ \psi_{dr} = L_r i_{dr} + L_m i_{qr} + \psi_{drf} \\ \psi_{qr} = L_r i_{qr} + L_m i_{dr} + \psi_{qrf} \end{cases} \quad (4.27)$$

式中,  $L_m$  是定子和转子在发电机同一相绕组轴线之间的等值互感参数,

$$L_m = \frac{3}{2} L_{ms} \quad (4.28)$$

$L_s$  为定子  $dq$  旋转坐标系两相的等值自感参数, 其大小为  $L_{ss} + \frac{3}{2} L_{ms}$ ;  $L_r$  是转子的  $dq$  轴等效电感, 大小为  $L_{sr} + \frac{3}{2} L_{ms}$ 。

产生系数 3/2 的原因是, 这里是用两相绕组来等效变换前的三相绕组的。在同步转速坐标系下, 双馈风力发电机模型如图 4.12 所示。

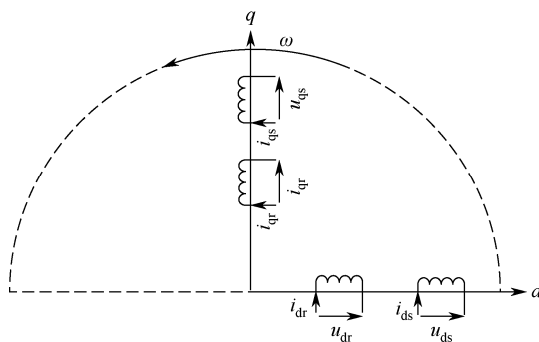


图 4.12 双馈风力发电机同步转速坐标系下的物理模型

电磁转矩可写为

$$T_e = pL_m(i_{qs}i_{dr} - i_{ds}i_{qr}) \quad (4.29)$$

## 4.3 双馈风力发电机稳态并网的调节方法

### 4.3.1 网侧 PWM 变换器的建模与控制

双馈风力发电系统如图 4.13 所示。通常利用两个 PWM 变换器实现能量的双向转化, 双向背靠背 PWM 变换器由网侧 PWM 变换器 (GSC) 和转子侧 PWM 变换器 (RSC) 组成。GSC 的作用比较重要, 它必须维持信号的输入来满足正常的发电要求, 即让注入波形接近

正弦波；另一方面，在电网不稳定时，要能将母线的电压稳定在一定的范围内。双 PWM 变换器安全稳定工作的前提是直流母线电压保持稳定，这需要通过控制输入电流的有效控制来实现。转子侧 PWM 的功能主要是，为双馈风力发电机的转子输入满足要求的交流电流，保证能够输出合适的无功。它的控制对象是双馈发电机。另一个作用是控制转子电流，达到控制双馈风力发电机定子侧发出无功功率的目的，实现风能的最大追踪。

双向背靠背 PWM 变换器通常有电压型和电流型两种。由于三相电压型 PWM 变换器优点较多，易于控制，所以其在风力发电系统中的应用较为常见。

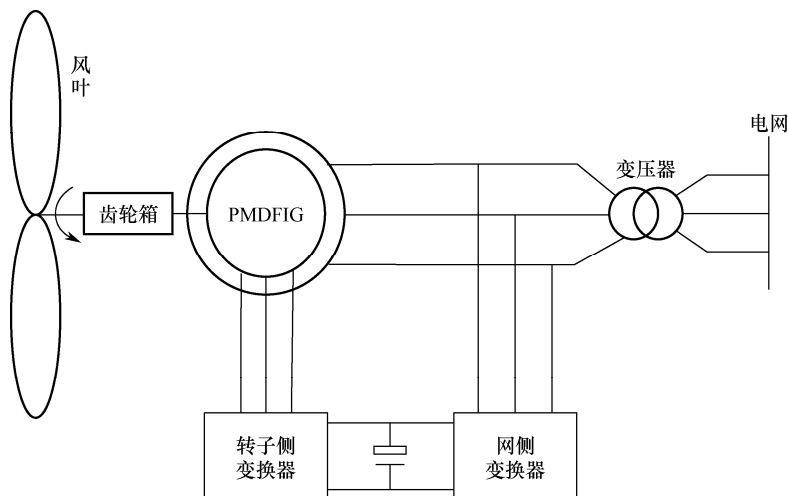


图 4.13 双馈风力发电系统示意图

三相 GSC 的拓扑结构如图 4.14 所示，图中  $u_{ga}$ 、 $u_{gb}$  与  $u_{gc}$  是电压； $i_{ga}$ 、 $i_{gb}$  与  $i_{gc}$  是电流； $v_{ga}$ 、 $v_{gb}$  和  $v_{gc}$  是网侧 GSC 电压； $U_{dc}$  是电容上的电压； $i_{load}$  是直流侧电流， $L_{ga}$ 、 $L_{gb}$  和  $L_{gc}$  是线路电抗器电感； $R_{ga}$ 、 $R_{gb}$  和  $R_{gc}$  是电抗器电阻； $C$  是电容。

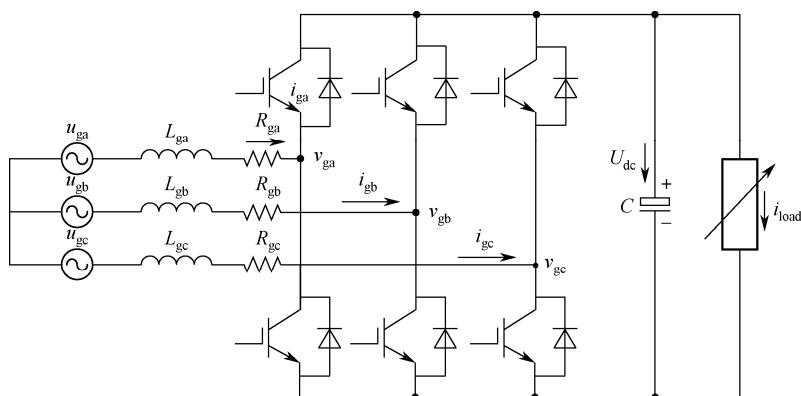


图 4.14 三相 GSC 拓扑结构

图 4.14 中的功率器件若均为理想化元件，则在三相静止坐标系中，GSC 的数学模型可以表示为



$$\begin{cases} u_{ga} - i_{ga} R_{ga} - L_{ga} \frac{di_{ga}}{dt} - S_{ga} V_{dc} = u_{gb} - i_{gb} R_{gb} - L_{gb} \frac{di_{gb}}{dt} - S_{gb} V_{dc} \\ u_{gb} - i_{gb} R_{gb} - L_{gb} \frac{di_{gb}}{dt} - S_{gb} V_{dc} = u_{gc} - i_{gc} R_{gc} - L_{gc} \frac{di_{gc}}{dt} - S_{gc} V_{dc} \\ C \frac{dV_{dc}}{dt} = S_{ga} i_{ga} + S_{gb} i_{gb} + S_{gc} i_{gc} - i_{load} \end{cases} \quad (4.30)$$

式中,  $S_{ga}$ 、 $S_{gb}$  和  $S_{gc}$  是 GSC 控制三相通断的变量, 上桥臂接通时其值是 1, 此时下桥臂断开 (其值是 0)。  $u_{ga}$ 、 $u_{gb}$ 、 $u_{gc}$  是网侧电压,  $i_{ga}$ 、 $i_{gb}$ 、 $i_{gc}$  为 GSC 三相输入电流,  $v_{ga}$ 、 $v_{gb}$  和  $v_{gc}$  是桥臂中点的电压,  $L_{ga}$ 、 $L_{gb}$ 、 $L_{gc}$  是 GSC 输入电感,  $R_{ga}$ 、 $R_{gb}$  和  $R_{gc}$  是电阻值,  $i_{load}$  是负载电流,  $V_{dc}$  是直流侧电容两端的电压,  $C$  是变换器的电容值。

变频器一般是交流三相式的, 而且没有中性线被引出, 所以三相系统中的零序分量为 0。由 KCL 定律得

$$i_{ga} + i_{gb} + i_{gc} = 0 \quad (4.31)$$

由式(4.30)和式(4.31)可知

$$\begin{cases} L_{ga} \frac{di_{ga}}{dt} = u_{ga} - i_{ga} R_{ga} - \frac{u_{ga} + u_{gb} + u_{gc}}{3} - \left[ S_a - \frac{S_{ga} + S_{gb} + S_{gc}}{3} \right] V_{dc} \\ L_{gb} \frac{di_{gb}}{dt} = u_{gb} - i_{gb} R_{gb} - \frac{u_{ga} + u_{gb} + u_{gc}}{3} - \left[ S_b - \frac{S_{ga} + S_{gb} + S_{gc}}{3} \right] V_{dc} \\ L_{gc} \frac{di_{gc}}{dt} = u_{gc} - i_{gc} R_{gc} - \frac{u_{ga} + u_{gb} + u_{gc}}{3} - \left[ S_c - \frac{S_{ga} + S_{gb} + S_{gc}}{3} \right] V_{dc} \\ C \frac{dV_{dc}}{dt} = S_{ga} i_{ga} + S_{gb} i_{gb} + S_{gc} i_{gc} - i_{load} \end{cases} \quad (4.32)$$

网侧变换器 GSC 的输出电压与通断函数  $S_{ga}$ 、 $S_{gb}$  和  $S_{gc}$  之间存在以下关系:

$$\begin{cases} v_{gab} = (S_{ga} - S_{gb}) V_{dc} \\ v_{gbc} = (S_{gb} - S_{gc}) V_{dc} \\ v_{gca} = (S_{gc} - S_{ga}) V_{dc} \end{cases} \quad (4.33)$$

用相电压表示为

$$\begin{cases} v_{ga} = \left[ S_{ga} - \frac{(S_{ga} + S_{gb} + S_{gc})}{3} \right] V_{dc} \\ v_{gb} = \left[ S_{gb} - \frac{(S_{ga} + S_{gb} + S_{gc})}{3} \right] V_{dc} \\ v_{gc} = \left[ S_{gc} - \frac{(S_{ga} + S_{gb} + S_{gc})}{3} \right] V_{dc} \end{cases} \quad (4.34)$$

将式(4.33)代入式(4.32)得

$$\begin{cases} L_{ga} \frac{di_{ga}}{dt} = u_{ga} - i_{ga} R_{ga} - \frac{u_{ga} + u_{gb} + u_{gc}}{3} - v_{ga} \\ L_{gb} \frac{di_{gb}}{dt} = u_{gb} - i_{gb} R_{gb} - \frac{u_{ga} + u_{gb} + u_{gc}}{3} - v_{gb} \\ L_{gc} \frac{di_{gc}}{dt} = u_{gc} - i_{gc} R_{gc} - \frac{u_{ga} + u_{gb} + u_{gc}}{3} - v_{gc} \\ C \frac{dV_{dc}}{dt} = S_{ga} i_{ga} + S_{gb} i_{gb} + S_{gc} i_{gc} - i_{load} \end{cases} \quad (4.35)$$

式(4.35)可以在交流三相电网的所有故障情况下使用。

#### 4.3.2 GSC 在旋转坐标系中的建模

从三相固定的  $ABC$  坐标系变换为两相固定的  $\alpha\beta$  坐标系，我们称之为 3s/2s 坐标变换，它可用如下矩阵表示：

$$C_{3s/2s} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \quad (4.36)$$

从两相固定的  $\alpha\beta$  坐标系变换为三相固定的坐标系  $ABC$ ，可用矩阵表示如下：

$$C_{2s/3s} = C_{3s/2s}^{-1} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \quad (4.37)$$

易知静止  $\alpha\beta$  坐标系变换为任意转速  $dq$  坐标系的矩阵为

$$C_{2s/2r} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \quad (4.38)$$

式中， $\theta$  是发电机  $d$  方向坐标轴与  $\alpha$  方向坐标轴之间的夹角； $\omega$  是任意转速下的电角度。2s/2r 的逆变换为

$$C_{2r/2s} = C_{2s/2r}^{-1} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \quad (4.39)$$

设空间中存在任意一个向量  $F$ （可以表示电压、电流或磁链等既有大小又有方向的向量），则它在三个坐标系下的位置关系如图 4.15 所示。

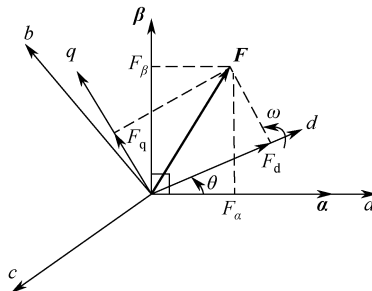


图 4.15 向量在三个坐标系下的位置关系

为简化计算,可近似认为电机中的电阻大、电感大小相等,可即  $L_{ga} = L_{gb} = L_{gc} = L_g$ ,  $R_{ga} = R_{gb} = R_{gc} = R_g$ 。由三相坐标系变换为两相坐标系,即由式(4.35)变换为式(4.40)的 GSC 方程为

$$\begin{cases} u_{g\alpha} = R_g i_{g\alpha} + L_g \frac{di_{g\alpha}}{dt} + v_{g\alpha} \\ u_{g\beta} = R_g i_{g\beta} + L_g \frac{di_{g\beta}}{dt} + v_{g\beta} \\ C \frac{dV_{dc}}{dt} = \frac{3}{2} (S_\alpha i_{g\alpha} + S_\beta i_{g\beta}) - i_{load} \end{cases} \quad (4.40)$$

由式(4.38)和式(4.40)可知,在旋转速度为  $\omega$  的任意平面中, GSC 方程为

$$\begin{cases} u_{gd} = R_g i_{gd} + L_g \frac{di_{gd}}{dt} - \omega L_g i_{gq} + v_{gd} \\ u_{gq} = R_g i_{gq} + L_g \frac{di_{gq}}{dt} + \omega L_g i_{gd} + v_{gq} \\ C \frac{dV_{dc}}{dt} = \frac{3}{2} (S_d i_{gd} + S_q i_{gq}) - i_{load} \end{cases} \quad (4.41)$$

式中,  $u_{gd}$ 、 $u_{gq}$  分别表示系统  $d$  轴和  $q$  轴方向的电压;  $i_{gd}$ 、 $i_{gq}$  分别表示系统  $d$  轴和  $q$  轴方向的电流;  $v_{gd}$ 、 $v_{gq}$  分别是 PWM 中  $d$  轴和  $q$  轴的电压;  $S_d$ 、 $S_q$  分别是电路是否接通的  $d$  和  $q$  值。

### 4.3.3 双馈风力发电机相量调节方法

在电力系统中,通常假设发电机定子电压的幅值和频率恒定。双馈风力发电系统连接到电网时,相量调节方法一般能把定子电压相量定向到 SVO。本章采用 SVO 调节方法来控制双馈风力发电机对称运行时的发电。

稳态条件下,对交流励磁双馈异步风力发电机的 RSC 采用 SVO 相量进行控制,将  $d$  轴设定为定子电压方向,使  $q$  轴电压分量为零,因此可以很容易地分别控制 RSC 侧的有功功率和无功功率。

若  $d$  轴设定在定子轴的电压方向上,则有  $u_{qs} = 0$ 。发电机和电网系统正常运行时,发电机的定子电压保持恒定,即  $pu_{ds} = 0$ ,此时发电机  $dq$  轴方向上的磁链亦恒定,易得到发电机定子电压为

$$\begin{cases} u_{ds} = -\omega_l \psi_{qs} - R_s i_{ds} \\ u_{qs} = \omega_l \psi_{ds} - R_s i_{qs} = 0 \end{cases} \quad (4.42)$$

发电机正常运行时,定子中流过的电流频率为工频 50Hz,因此可近似认为定子电抗比定子绕组在数值上大得多(即与电抗相比定子绕组大小可不计)。此时有

$$\begin{cases} i_{ds} = \frac{L_m}{L_s} i_{dr} + \frac{1}{L_s} \psi_f \\ i_{qs} = \frac{L_m}{L_s} i_{qr} + \frac{u_{ds}}{\omega_l L_s} \end{cases} \quad (4.43)$$

功率方程为

$$\begin{cases} P = u_{ds}i_{ds} + u_{qs}i_{qs} = u_{ds}\left(\frac{L_m}{L_s}i_{dr} + \frac{1}{L_s}\psi_f\right) \\ Q = u_{qs}i_{ds} + u_{ds}i_{qs} = u_{ds}\left(\frac{L_m}{L_s}i_{qr} + \frac{u_{ds}}{\omega_1 L_s}\right) \end{cases} \quad (4.44)$$

可知，有功功率  $P$  的大小取决于转子  $d$  轴电流，而无功功率  $Q$  取决于转子  $q$  轴电流。

由式(4.18)和式(4.44)，可得转子电压方程为

$$\begin{cases} u_{dr} = R_r i_{dr} + \frac{L_r L_s - L_m^2}{L_s} p i_{dr} - \omega_s \psi_{qr} = R_r i_{dr} + \frac{L_r L_s - L_m^2}{L_s} p i_{dr} + \Delta u_{dr} \\ u_{qr} = R_r i_{qr} + \frac{L_r L_s - L_m^2}{L_s} p i_{qr} + \omega_s \psi_{dr} = R_r i_{qr} + \frac{L_r L_s - L_m^2}{L_s} p i_{qr} + \Delta u_{qr} \end{cases} \quad (4.45)$$

转子  $dq$  轴电压分量分别是  $u_{dr}$  和  $u_{qr}$ ，二者能够协调控制器独立控制两个方向的电压分量， $\Delta u_{dr}$  和  $\Delta u_{qr}$  两个电压分量可用来抵消转子电压之间的相互影响。因此，基于 SVO 系统整体进行调整，可对转子电流的有功分量和无功分量可单独实施调节，进而利用本算法完成电能输出的有功和无功协调调节。

正常运行时，由于电网电压恒定不变，因此对双馈风力发电机并网的控制相对简单。在图 4.16 中，双馈风力发电系统 RSC 励磁控制器采用 SVO 相量控制，其中主要采用双闭环的传统 PI 控制方案。

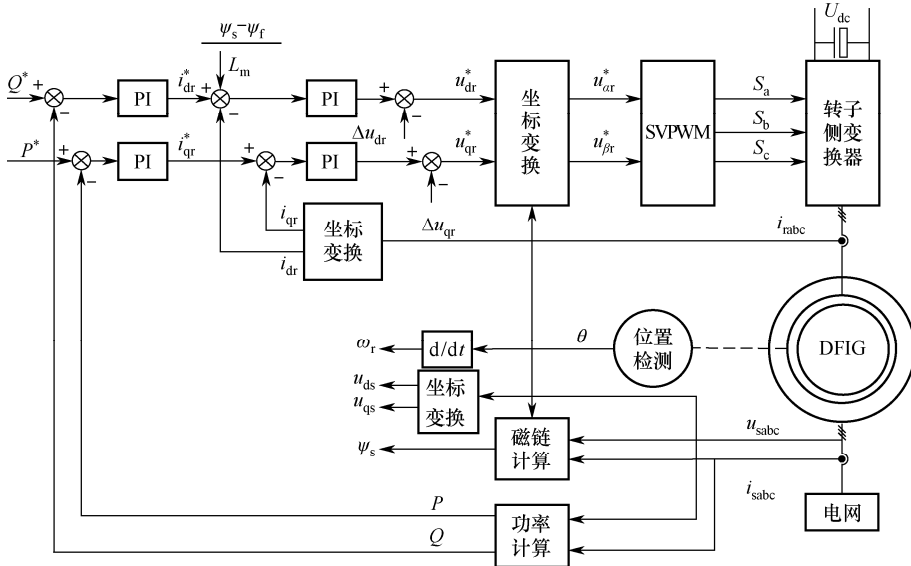


图 4.16 双馈风力发电系统的 SVO 组成

图 4.16 表明，PI 为常见的比例积分控制器，不带上标符号的量为实际量，带上标符号的量为设定值。 $u_{ar}$  是加在转子绕组上的  $\alpha$  轴方向的电压分量， $u_{\beta r}$  是加在转子绕组上的  $\beta$  轴

方向的电压分量,  $U_{dc}$  是变换器电容上的电压分量,  $i_{sabc}$  是发电机定子电流分量,  $i_{rabc}$  是转子绕组电流分量,  $u_{sabc}$  是系统电压分量, SVPWM 是正弦调节函数波,  $S_a$ 、 $S_b$ 、 $S_c$  的值为 1 时开关导通, 为 0 时开关分断。

由图 4.16 可知, 在双馈风力发电机转子侧 RSC 的典型相量控制中, 控制环节主要由微分积分电压控制模块和微分积分电流模块共同完成, 电压模块的作用是保证直流侧的母线电压不变, 电流模块的作用是避免转子侧的 RSC 电流过大而烧毁, 且能将  $q$  轴电流设置为零, 因此能实现单位功率因数的效果。

#### 4.3.4 双馈风力发电机的稳态性能

双馈风力发电系统如图 4.17 所示, 系统中物理量的数值大小如下: 发电机的额定功率  $P = 1.5\text{MW}$ ; 定子额定电压为  $690\text{V}$ , 定子电阻标幺值为  $0.01\text{pu}$ , 转子电阻标幺值为  $0.008\text{pu}$ , 定子漏感标幺值为  $0.16\text{pu}$ , 转子漏感标幺值为  $0.149\text{pu}$ , 互感标幺值为  $2.3\text{pu}$ , 定子、转子匝数比为  $0.35$ 。

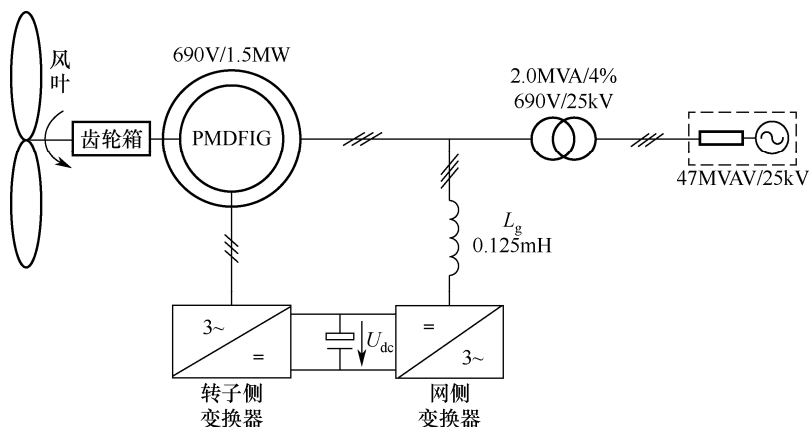


图 4.17 双馈风力发电系统示意图

基于以上分析, 作者建立了风力发电系统的数学模型, 并利用 MATLAB/Simulink 仿真软件建立了风力发电系统的并网仿真模型。图 4.18 是建立的 RSC 模型, 图 4.19 是建立的 SVPWM 仿真模型, 图 4.20 是风力发电系统整体仿真控制模型。

在系统仿真过程中, 维持电网电压恒定, 设风力发电机的有功功率标幺值为 1, 没有无功功率产生。利用图 4.18 所示基于 SVO 的发电机相量控制方式进行动态仿真分析, 功率仿真具体结果如图 4.21 所示。

由图 4.21(a) 中有功功率变化的情况可知, 发电机有功功率的波动一直维持在约  $1.0\text{pu}$ , 能达到有功功率基本稳定的控制要求; 由图 4.21(b) 中无功功率的变化情况可知, 发电机无功功率的波动也基本稳定, 即维持在约  $0\text{pu}$ 。

发电机转子侧  $d$  轴方向和  $q$  轴方向的电流变化曲线如图 4.22 所示。可知, 双馈风力发电机能够进入变速运行状态, 输出的电能是恒频恒压的。

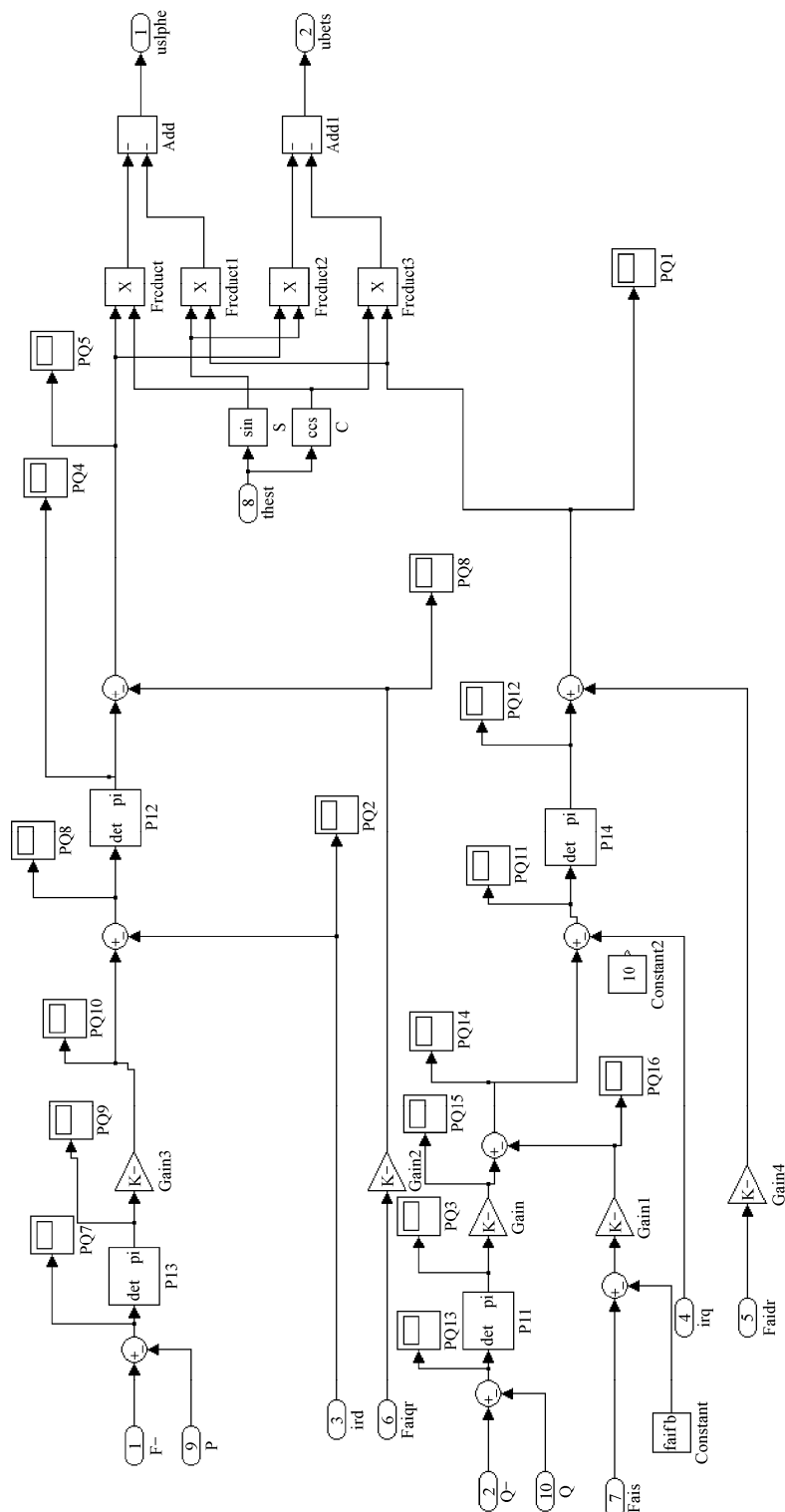


图 4.18 转子侧控制器模型

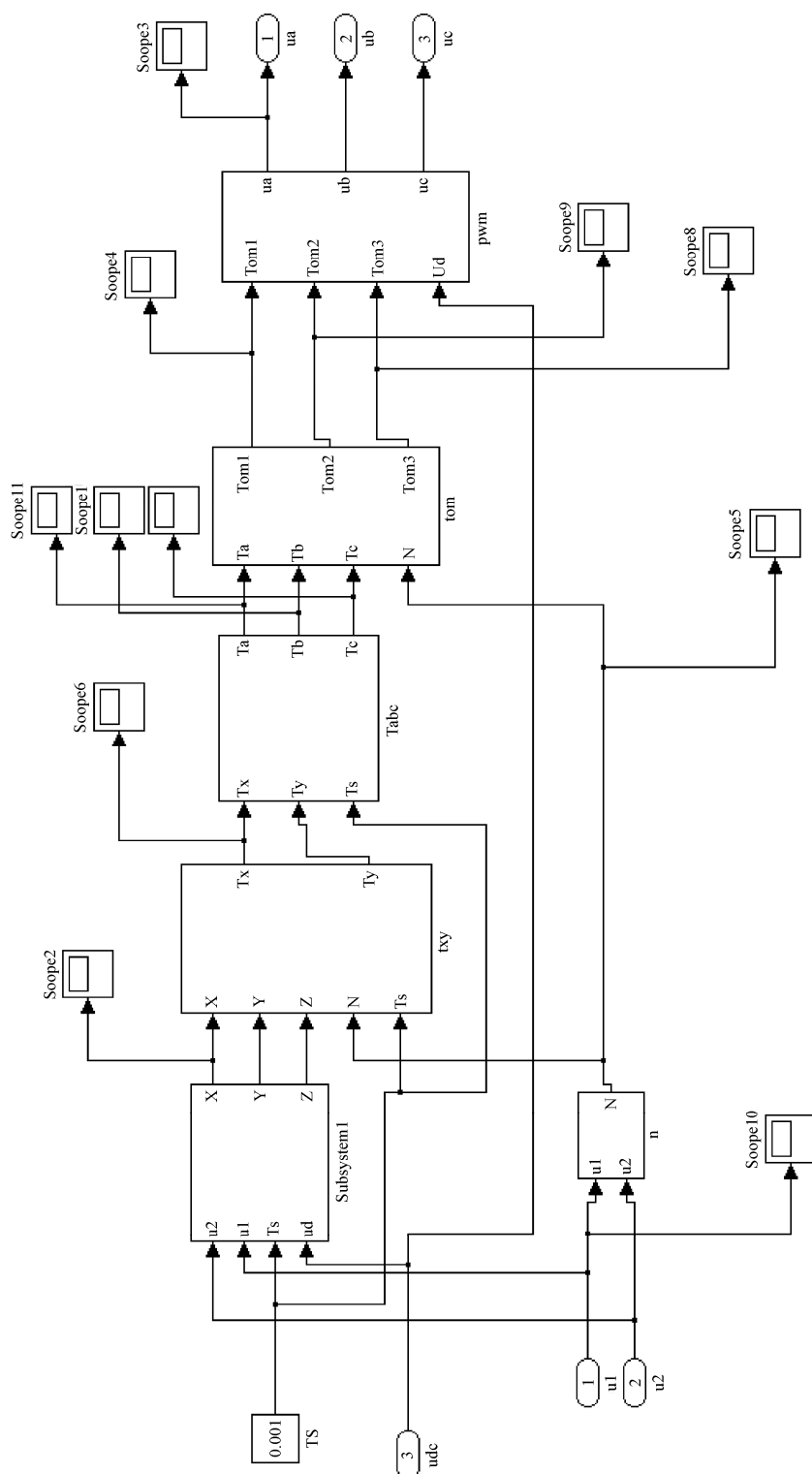


图 4.19 SVPWM 仿真模型

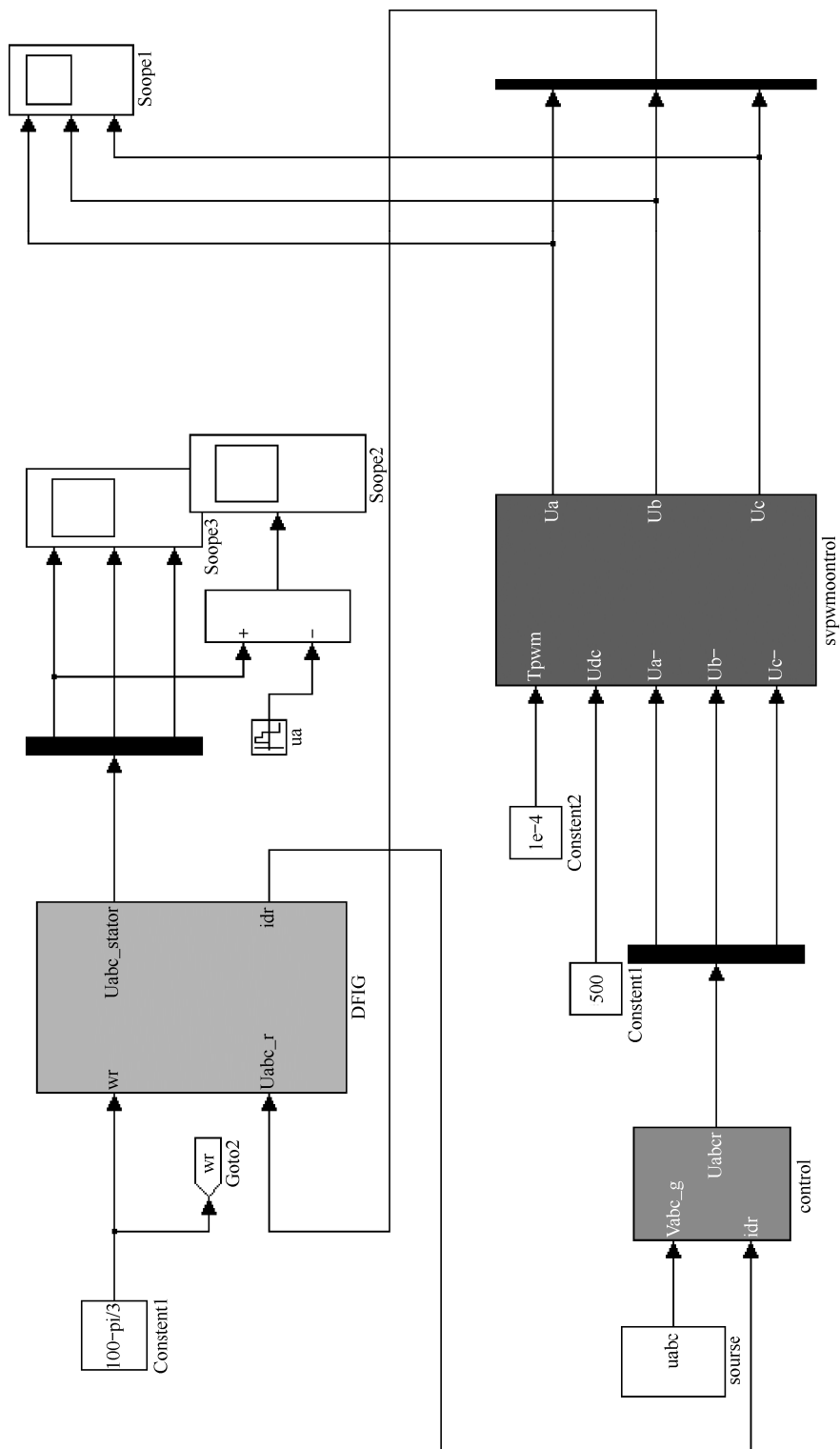


图 4.20 风力发电系统仿真控制模型



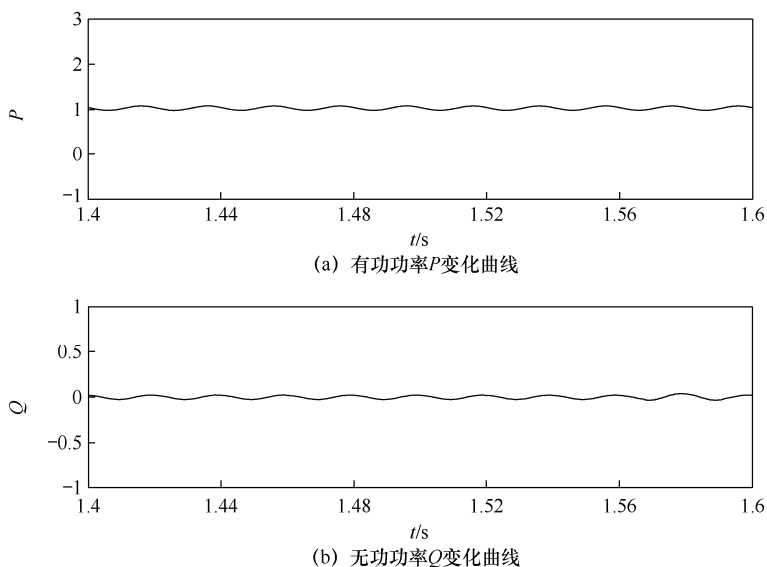


图 4.21 双馈风力发电系统采用 SVO 控制方式时的功率波形

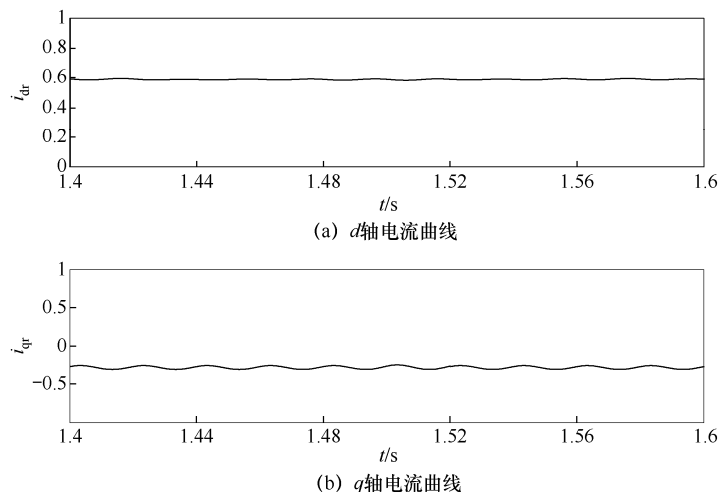


图 4.22 双馈风力发电系统采用 SVO 控制方式时，转子侧的电流曲线

## 4.4 交流三相电网电压突然降落时双馈风力发电系统的仿真研究

### 4.4.1 交流三相电网电压突然降落时的 RSC 控制方法

相关供电规范规定，风力发电系统应具有在三相电网电压突然降落时，短时间内保证可靠并网的能力，而单靠发电机的自身调节能力显然难以实现这一目的，因此必须采取相应的技术措施。目前，可用的常见措施有定子磁链定向和定子电压定向。由于定子磁链的观测无法达到一定的精度，且控制效果不理想，故本章利用定子电压定向来研究故障时风力发电机的控制措施。

双馈风力发电机的 RSC 采用 SVO 相量控制手段来进行，即把  $d$  轴固定在定子电压的方向。此时， $q$  轴电压为零，可据此来完成转子 RSC 功率的解耦。

由于三相交流电网容易发生意外的问题，因此必须保证风力发电机组具有克服短时故障的能力，直到电网故障清除。利用反馈控制原理，即把双馈风力发电机定子励磁电流动态过程反馈到控制器输入端，可以构建适合相量控制的较为简化的数学模型。

基于同步旋转坐标系，双馈风力发电机的电压方程为

$$\begin{cases} u_s = -R_s i_s + p\psi_s + j\omega_s \psi_s \\ u_r = R_r i_r + p\psi_r + j\omega_s \psi_r \end{cases} \quad (4.46)$$

磁链方程为

$$\begin{cases} \psi_s = -L_s i_s + L_m i_r \\ \psi_r = -L_m i_s + L_r i_r \end{cases} \quad (4.47)$$

设定子励磁电流的等效值为

$$i_{m0} = \frac{\psi_s}{L_m} = \frac{L_s}{L_m} i_s + i_r \quad (4.48)$$

由于  $L_m/L_s \approx 1$ ，由式(4.47)和式(4.48)得到转子磁链为

$$\psi_r = -\psi_s + \left( \frac{L_m^2}{L_s} - L_r \right) i_{rf} = -\frac{L_m^2}{L_s} i_{m0} + \left( L_r + \frac{L_m^2}{L_s} \right) i_{rf} \quad (4.49)$$

将式(4.48)和式(4.49)代入式(4.46)得

$$\begin{cases} u_s = -R_s i_s + L_m \frac{di_{m0}}{dt} + j\omega_s \psi_s \\ u_r = R_r i_r + j\omega_s \psi_r - \frac{L_m^2}{L_s} \frac{di_{m0}}{dt} + \left( L_r + \frac{L_m^2}{L_s} \right) \frac{di_r}{dt} \end{cases} \quad (4.50)$$

三相交流电网的电压恒定时，双馈风力发电机的定子电压和定子绕组产生的磁链不随时间变化，即  $di_{m0}/dt = 0$ 。但在故障期间，定子电压  $u_s$  和定子磁链  $\psi_s$  连续波动，即  $di_{m0}/dt \neq 0$ 。由式(4.46)可得定子电压表达式为

$$\frac{di_{m0}}{dt} = \frac{1}{L_m} (u_s - R_s i_s - j\omega_s \psi_s) \quad (4.51)$$

将式(4.51)代入式(4.50)，得转子电压表达式为

$$u_r = \left( L_r + \frac{L_m^2}{L_s} \right) \frac{di_r}{dt} + \left[ R_r + j\omega_s \left( \frac{L_m^2}{L_s} - L_r \right) \right] i_r - j\omega_s \psi_s - (u_s + R_s i_s - j\omega_s \psi_s) \quad (4.52)$$

采用基于 SVO 的方法时，有  $u_{sd} = u_s$ ，可知定子  $q$  轴电压  $u_{sq} = 0$ ，得

$$\begin{cases} u_{dr} = R_r i_{dr} + \left( L_r + \frac{L_m^2}{L_s} \right) p i_{dr} + \Delta u_{dr} + \Delta u'_{dr} \\ u_{qr} = R_r i_{qr} + \left( L_r + \frac{L_m^2}{L_s} \right) p i_{qr} + \Delta u_{qr} + \Delta u'_{qr} \end{cases} \quad (4.53)$$

式中，

$$\begin{cases} \Delta u'_{dr} = -u_s + R_s i_{sd} - \omega_s \psi_{sq} \\ \Delta u'_{qr} = -R_s i_{sq} - \omega_s \psi_{sd} \end{cases}$$

由此可知，以上实现了相量 SVO 系统控制。

考虑定子励磁电流变化的 SVO 系统简图如图 4.23 所示。

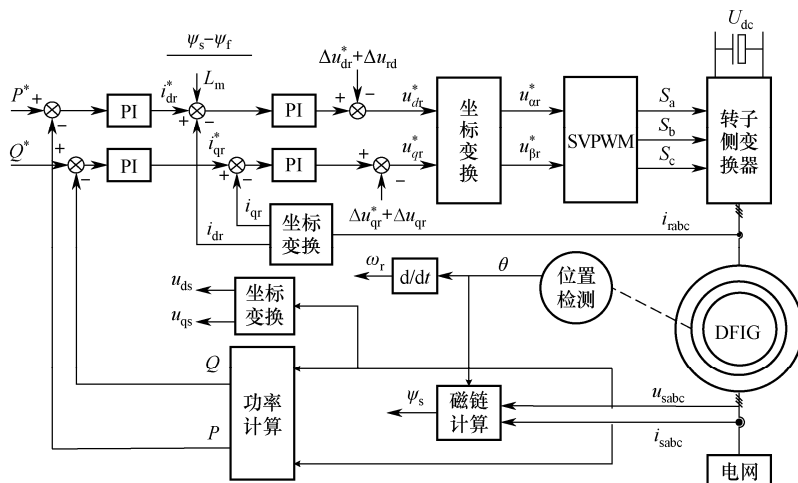


图 4.23 双馈风力发电系统相量控制简图

图中，PI 是比例积分环节，右上角带有符号\*的物理量为设定物理量。 $u_{\alpha}$  和  $u_{\beta}$  为转子侧电压的  $\alpha$  轴方向和  $\beta$  轴方向的分量， $U_{dc}$  为直流母线电压， $S_a$ 、 $S_b$  和  $S_c$  是逆变电路的可控开关函数。

#### 4.4.2 三相交流电网电压突然降落时 GSC 应采取的措施

在旋转坐标系下采用 SVO 相量控制措施，把  $d$  轴固定到电网电压的方向，可得

$$v_{gd} = V_g, \quad v_{gq} = 0 \quad (4.54)$$

从 GSC 注入电网的有功功率  $P$  和无功功率  $Q$  的表达式为

$$\begin{aligned} P &= v_{gd} i_d + v_{gq} i_q = V_g i_d \\ Q &= v_{gq} i_d - v_{gd} i_q = -V_g i_q \end{aligned} \quad (4.55)$$

要在电网故障期间使 GSC 平稳运行，GSC 必须能够抵御外来因素导致的波动，这可以采取把电网电压作为前馈补偿项的方法来实现。电网电压小幅降落时，调整 PWM 的输出，能够实现发电机输出的动态稳定，达到抑制直流电容母线两端电压波动的效果，防止 RSC 过流，最终保证 RSC 的正常高效运转。

由变换器原理可知，若忽略变流器损耗，且  $U_{dc}$  恒定，则电网瞬时有功功率和转子侧瞬时有功功率彼此应相等：

$$P_{gc} = v_{ga} i_a + v_{gb} i_b + v_{gc} i_c = v_{gd} i_d + v_{gq} i_q = v_{gd} i_d = v_{ra} i_{ra} + v_{rb} i_{rb} + v_{rc} i_{rc} = P_{cr} = u_{dc} i_{load} \quad (4.56)$$

式中， $P_{gc}$  为 GSC 任意时刻的有功功率， $v_{ga}$ 、 $v_{gb}$  与  $v_{gc}$  是任意时刻的电网电压， $i_a$ 、 $i_b$  与  $i_c$  是任意时刻的 GSC 电流， $P_{cr}$  是 RSC 任意时刻的有功功率， $v_{ra}$ 、 $v_{rb}$  与  $v_{rc}$  是 RSC 侧的电压瞬时值， $i_{ra}$ 、 $i_{rb}$  与  $i_{rc}$  是 RSC 侧电流任意时刻的值。

采取一定的措施改进风力发电控制系统，可在网侧得到合理的控制效果。将输入负载电流反馈到 GSC 的这种补偿控制措施，可以提高系统的抗扰动能力，进而有利于风力发电系统的正常运行和平稳运行。

要使直流母线上的电压  $U_{dc}$  稳定，应保证直流电容器不放电。GSC 和 RSC 功率平衡，即

$$P_{cr} = u_{dc} i_{load} = P_{gc} = v_{gd} i_d \quad (4.57)$$

$$i_d = P_{cr} / v_{gd} = u_{dc} i_{load} / v_{gd} \quad (4.58)$$

由式(4.41)可得

$$\begin{cases} u_{gd} = R_g i_{gd} + L_g \frac{di_{gd}}{dt} - \omega L_g i_{gq} + v_{gd} \\ u_{gq} = R_g i_{gq} + L_g \frac{di_{gq}}{dt} + \omega L_g i_{gd} + v_{gq} \end{cases} \quad (4.59)$$

易知, GSC 侧  $d$ 、 $q$  轴电流被两个电压分量  $v_{gd}$ 、 $v_{gq}$  干扰, 另外两个量  $\omega L_g i_{gq}$ 、 $\omega L_g i_{gd}$  也会对  $u_{gd}$ 、 $u_{gq}$  造成干扰。我们的目的是独立控制  $d$ 、 $q$  轴电流, 并把电网电压干扰造成的网侧控制器变量的波动降到最低, 因此要找到一种能解除  $d$ 、 $q$  轴电流耦合和消除电网电压扰动的有效方法。

设电流控制器的电压量为  $v'_{gd}$  和  $v'_{gq}$ , 则

$$\begin{cases} L_g \frac{di_{gd}}{dt} + R_g i_{gd} = v'_{gd} \\ L_g \frac{di_{gq}}{dt} + R_g i_{gq} = v'_{gq} \end{cases} \quad (4.60)$$

可得

$$\begin{cases} v_{gd} = -v'_{gd} + \omega L_g i_{gq} + u_{gd} \\ v_{gq} = -v'_{gq} - \omega L_g i_{gd} + u_{gq} \end{cases} \quad (4.61)$$

可知, 系统中出现了两个物理量  $\omega L_g i_{gq}$  和  $\omega L_g i_{gd}$ ,  $d$ 、 $q$  分量可以完全分离。这时, 可以利用这两个量对电压项采取前馈形式, 最终得到  $d$ 、 $q$  轴电流分量的独立表达式, 进而获得理想的系统性能。

综上所述, 为进一步获得较好的运行效果, 控制系统中可以引入负载电流前馈补偿和电压前馈补偿的双闭环策略, 如图 4.24 所示。

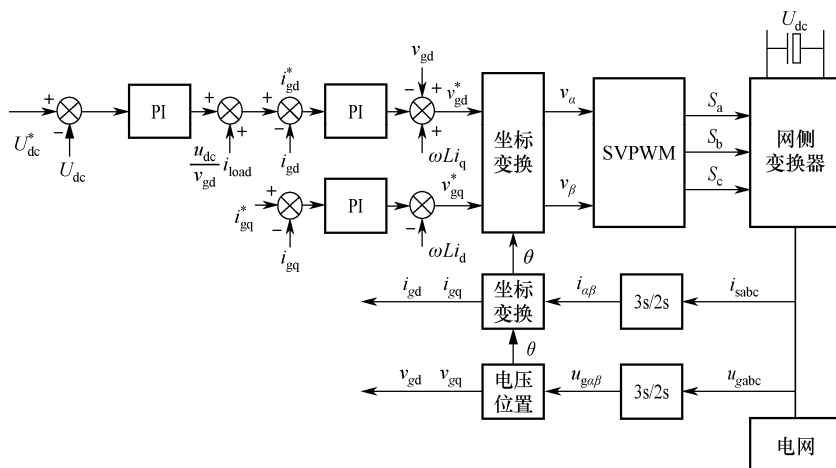


图 4.24 基于  $d$  轴 SVO 的 GSC 直流电压和电流的双闭环控制策略

由图 4.24 可知, 要将  $d$  轴电流和  $q$  轴电流完全解耦, 可对电流进行反馈。要使电网电

压的扰动得到控制,可对电压进行前馈控制。同样,对于负载来说,负载的扰动也要使用负载电流的前馈控制来实现。

要想使直流电容器上的电压  $U_{dc}$  恒定,应确保由 GSC 输入的瞬时有功功率  $P_{gc}$  等于转子侧的瞬时有功功率  $P_{cr}$ , 即  $P_{gc} = P_{cr}$ 。由式(4.57)得

$$P_{gc} = v_a i_a + v_b i_b + v_c i_c = v_d i_d + v_q i_q = v_d i_d = v_{ra} i_{ra} + v_{rb} i_{rb} + v_{rc} i_{rc} = P_{cr} = u_{dc} i_{load} \quad (4.62)$$

### 4.4.3 电网电压小幅降落时双馈风力发电机控制策略仿真分析

双馈风力发电机并网运行时,电网电压小幅下降导致电网故障的情况经常发生。在这种情况下,风力发电机并网的稳定性也需要得到可靠抑制。以下在电网电压小幅降落条件下,建立双馈风力发电机并网运行仿真模型,得到故障期间发电机瞬态电流和转矩波动的曲线。仿真选用的风力发电机的额定容量为 1.5MW,假设系统其他参数与上述稳态研究时的相同。给定发电机稳定运行  $t = 1s$ ,发生电压降落故障,即电网电压标么值从 1.0pu 突然降到 0.85pu,持续时间  $t = 0.3s$ 。采用 SVO 相量控制策略来并网分析瞬态特性。各物理量的仿真输出曲线波形如图 4.25 所示。

图 4.25(a)和(b)表明,双馈风力发电机在电网电压突然降落时,定子、转子电流的瞬态波动情况在实施控制后,能够保证在故障期间定子、转子不发生過电流的情况。

图 4.25(c)和(d)表明,双馈风力发电机在电网电压突然降落时,其功率波动在故障消除后能恢复到稳定运行状态。

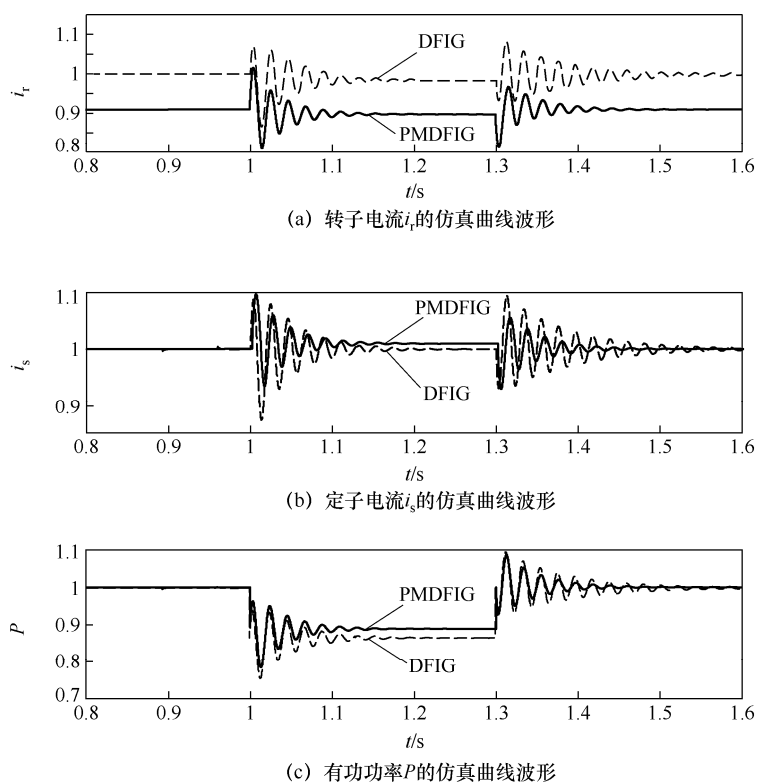
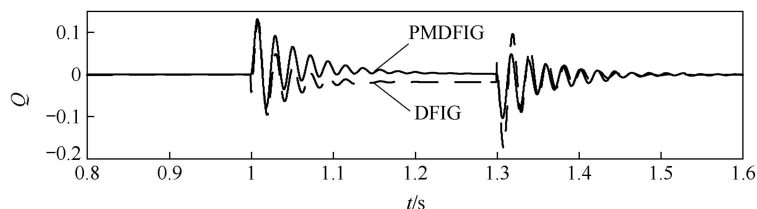


图 4.25 电网电压突然降落时,双馈风力发电系统的 SVO 控制仿真曲线



(d) 无功功率 $Q$ 的仿真曲线

图 4.25 电网电压突然降落时, 双馈风力发电系统的 SVO 控制仿真曲线 (续)

## 4.5 基于 SimPowerSystems 的双馈风力发电系统仿真实例

在 MATLAB/Simulink 工具箱的 SimPowerSystem 下拉菜单中, 打开风力发电机模块, 其中有三种类型, 即 Wind Turbine(风力机)、Wind Turbine Doubly-Fed Induction Generator(双馈风力发电机)和 Wind Turbine Induction Generator(感应风力发电机), 如图 4.26 所示。

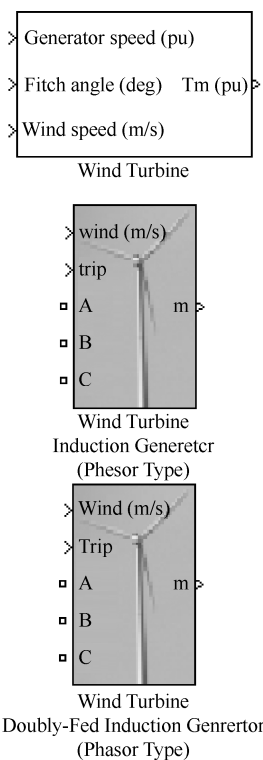


图 4.26 风力发电机的三种类型

Wind Turbine Doubly-Fed Induction Generator(双馈风力发电机)模块默认的输入设置有 5 个: A、B 和 C 是双馈风力发电机三相电信号的输入端; Wind 为发电机的风速信号输入端; Trip 端口的作用是保护系统输入信号, Trip 取逻辑值 0 时, 双馈风力发电机并网控制系统起作用, 否则并网控制系统不起作用; M 是混合信号输出端, 它包括双馈风力发电机

的定子、转子电压，定子、转子电流，有功功率和无功功率，发电机的机械转矩和电磁转矩，转子转速和桨叶桨距角等 29 个输出信号。

双击 Wind Turbine Doubly-Fed Induction Generator（双馈风力发电机）模块图标，可以打开发电机参数对话框。在 Display 下拉菜单中，可分别设置发电机参数、变换器参数、风力机参数和控制参数，如图 4.27 至图 4.30 所示。

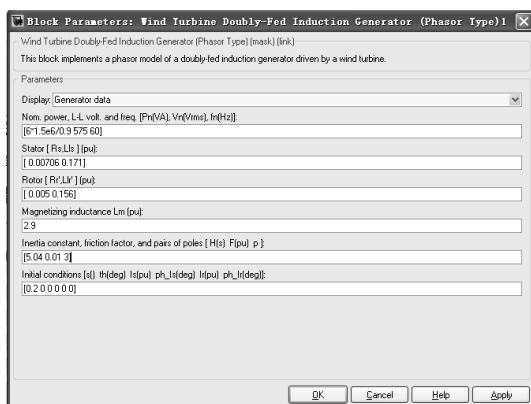


图 4.27 发电机参数设置对话框

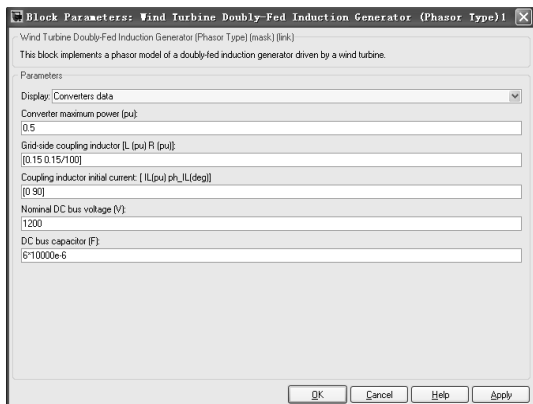


图 4.28 变换器参数设置对话框

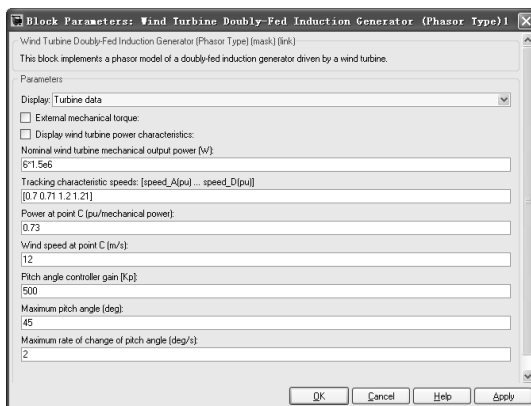


图 4.29 风力机参数设置对话框

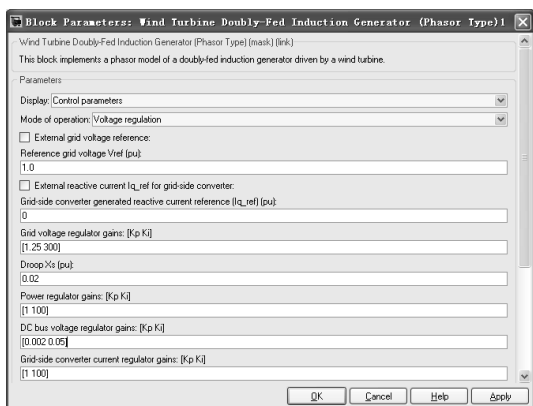


图 4.30 风力机控制参数设置对话框

在 MATLAB 的命令窗口中键入“power\_wind\_dfig”并回车，打开名为 power\_wind\_dfig 的文件，该文件是 MATLAB 自带的 9MW 风力发电系统仿真实例，如图 4.31 所示。

这个风力发电系统仿真实例主要由 6 台 1.5MW 的风力发电机组成，其中风速输入信号由 8m/s 阶跃变化到 14m/s。仿真算法采用 Variable-step（可变步长）中的 ode23tb 算法，仿真运行时间设定为 50s。

风力发电系统输入风速的设置如图 4.32 所示。

风力发电系统电力传输线的设置如图 4.33 所示。

风力发电系统电力系统的负荷设置如图 4.34 所示。

2MW 风力发电系统的 MATLAB 建模如图 4.35 所示。

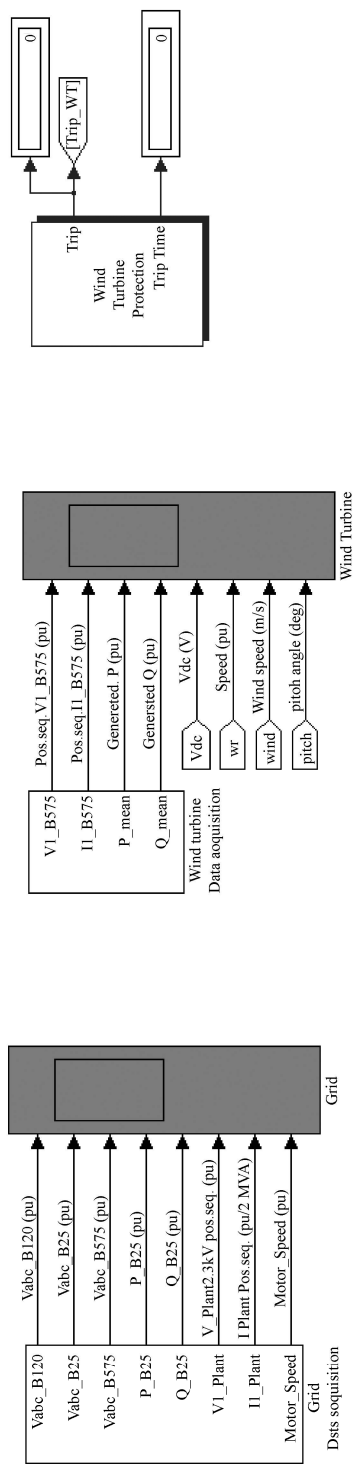
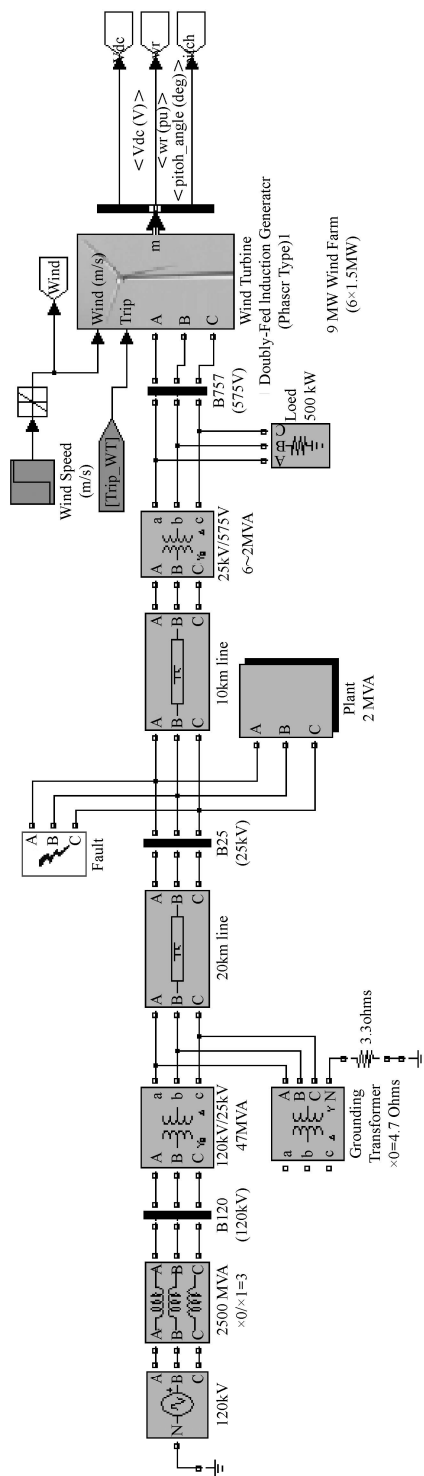


图 4.31 9MW 风电系统仿真模型



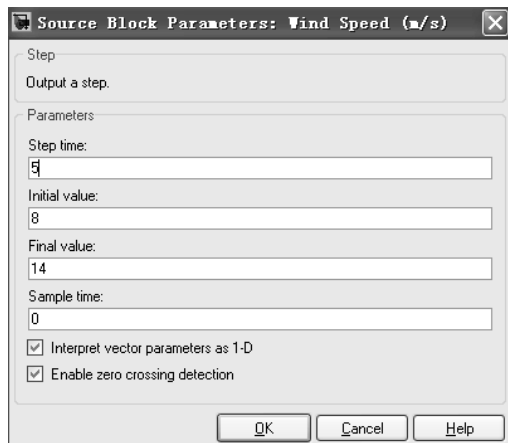


图 4.32 风力发电系统输入风速设置

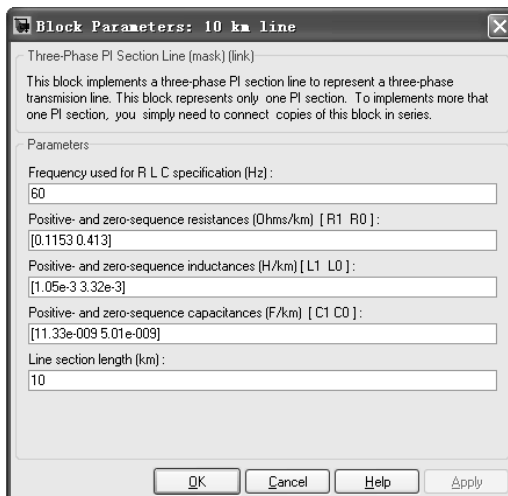


图 4.33 风力发电系统电力传输线设置

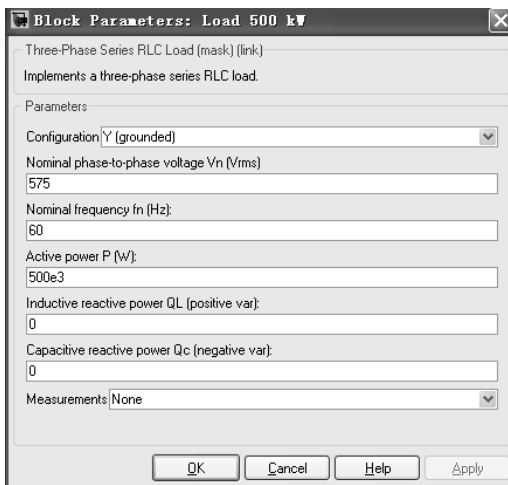


图 4.34 风力发电系统电力系统负荷设置

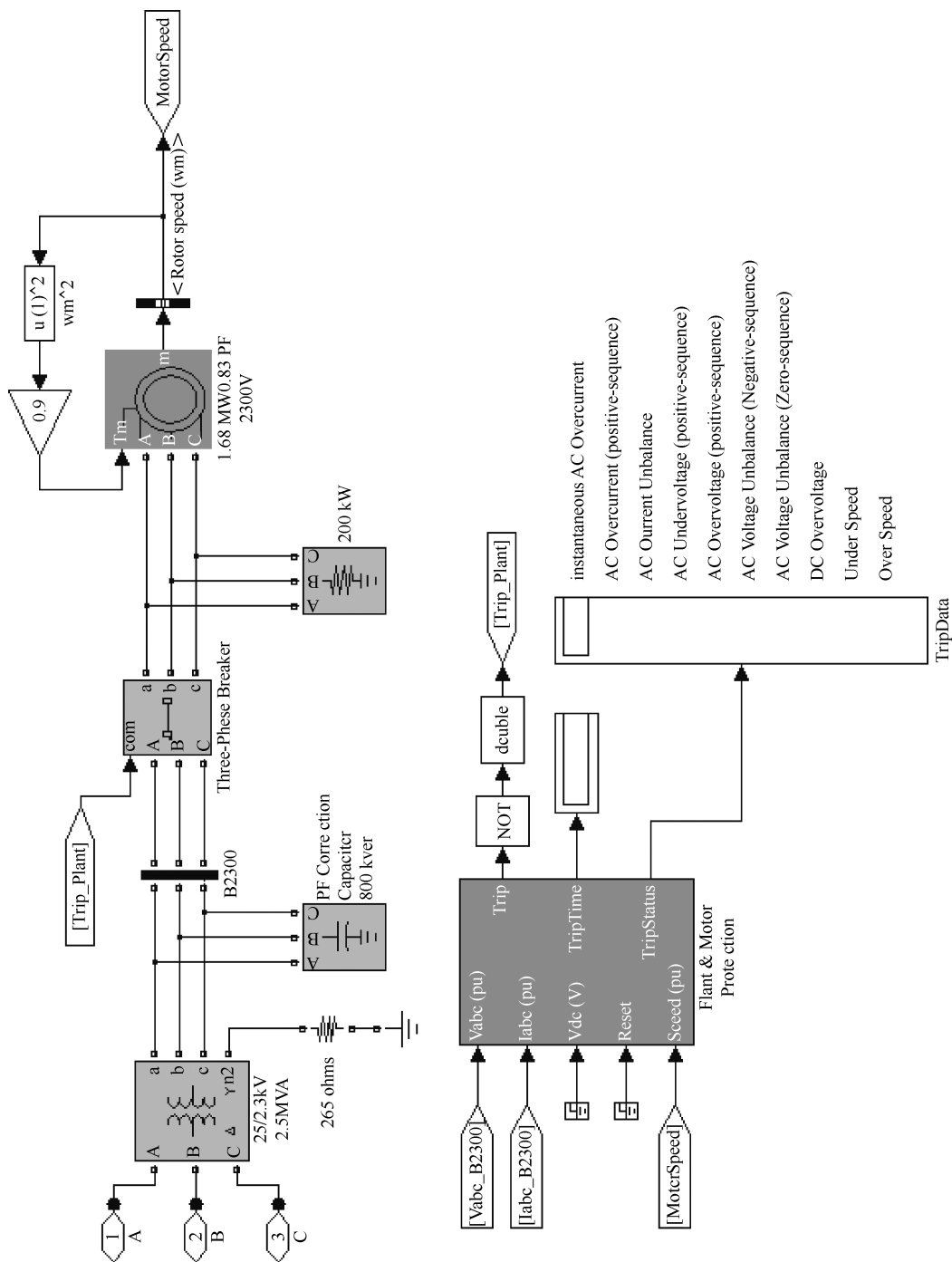


图 4.35 2MW 风力发电系统 MATLAB 建模

风力发电系统电网数据采集 MATLAB 建模如图 4.36 所示。

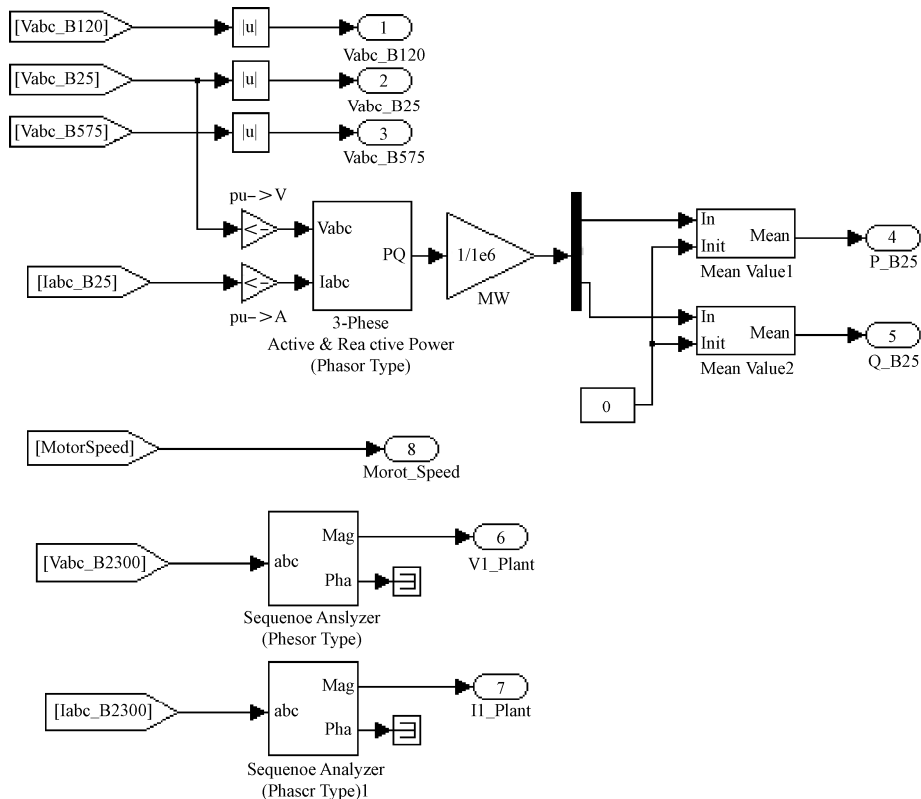


图 4.36 风力发电系统电网数据采集 MATLAB 建模

风力发电系统继电保护系统 MATLAB 建模如图 4.37 所示。

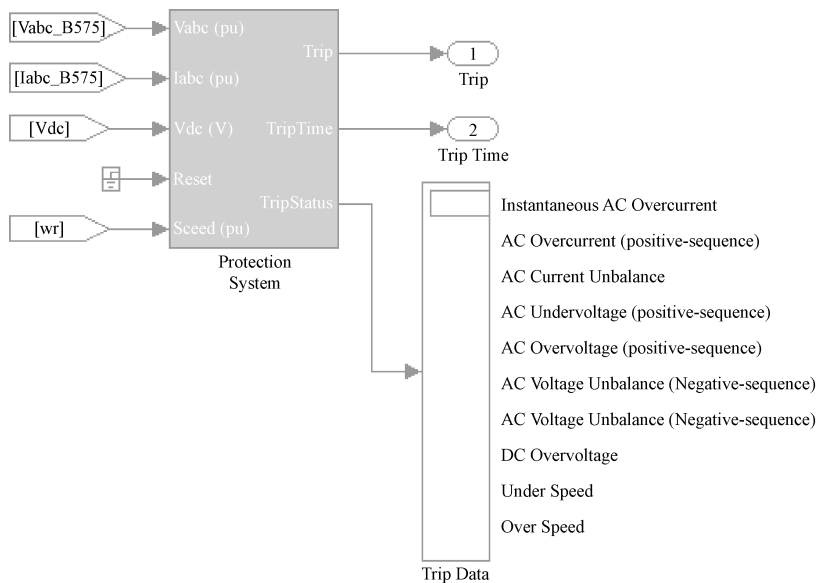


图 4.37 风力发电系统继电保护系统 MATLAB 建模

运行这个仿真模型后，得到的电网侧参数的仿真结果如图 4.38 所示。电网侧示波器主要显示电网电压经过三个三相变压器后的输出电压、有功功率和无功功率等信号。风力机侧示波器主要显示风速、发电机的有功功率和无功功率以及转速等信号。风力发电机侧的仿真结果如图 4.39 所示。

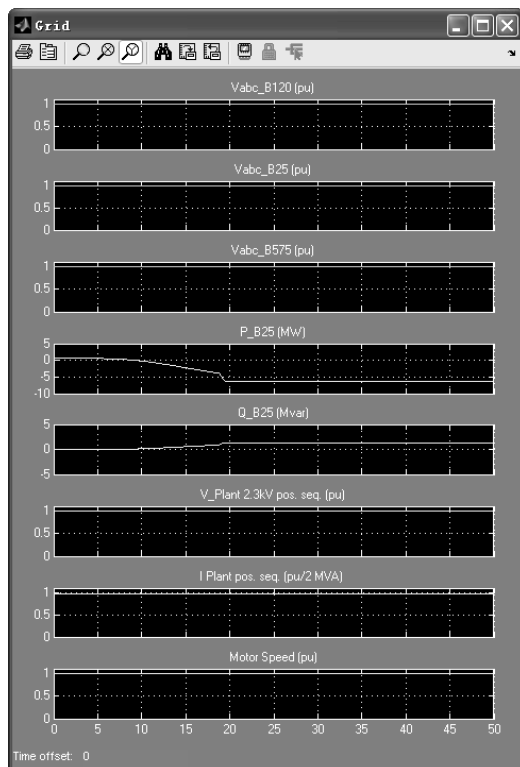


图 4.38 电网侧示波器仿真结果

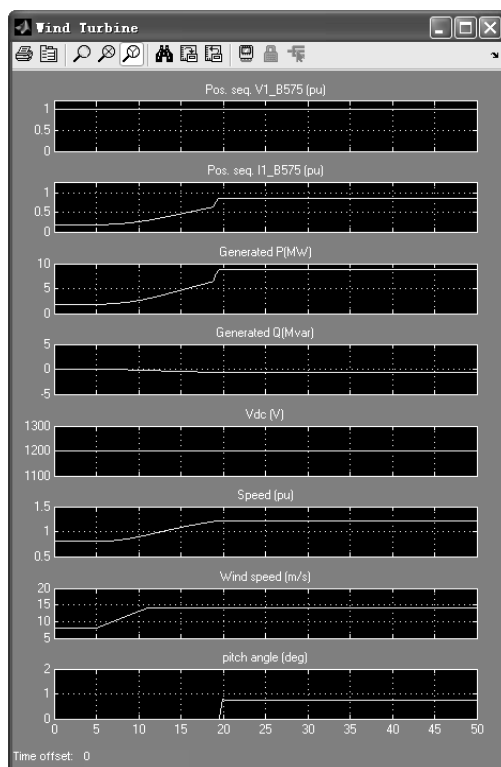


图 4.39 风力发电机侧示波器仿真结果

## 第5章 双转子风力发电系统及其仿真分析

目前，风能是最重要和最有前途的新能源之一。许多国家非常重视可再生能源开发和利用的主要原因是，它是无污染的、安全的和经济的。与此同时，相关风力发电技术也得到了迅速发展，传统的恒速恒频风力发电机对机械系统的加工精度和装配精度要求很高，协调不好就会使发电机的输出电压和功率不断波动。永磁直驱风电系统由于结构简单，发电成本低，故障期间的运行能力相对稳定，风力发电机和减速装置的配合比较容易实现，整个风电装置的振动较小，因此发电的输出比较理想。普通的双馈发电机（DFIG）目前使用普遍，它具有几个优点，如正弦输入电流可控功率因数、有功功率和无功功率的独立调节、具有双向功率高品质的直流输出电压等。普通双馈风力发电系统的主要缺点是大转子励磁容量和抗干扰能力低。然而，发电机结构设计得好，就有可能避免转子电压过高，并抑制转子电流的衰减振荡，减少网侧变换器（GSC）的过流。

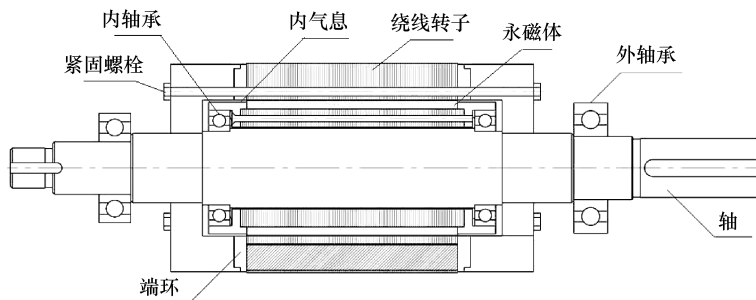
双转子风力发电机可以克服普通双馈风力发电机的主要缺点。有关研究表明，双转子结构发电机的稳态性能与普通双馈发电机相比有一些突出的优点。本章将研究一种带永磁转子的双转子风力发电机组成的风电系统。

### 5.1 双转子风力发电机系统的结构和数学模型

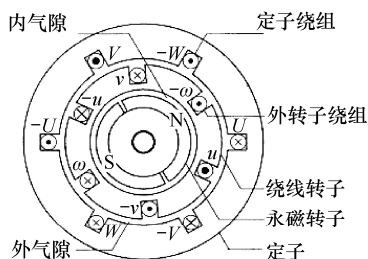
#### 5.1.1 双转子风力发电机的结构

本章研究的双转子风力发电机（Dual-Rotor Wind Generator, DRWG）的结构如图 5.1 所示。定子是传统的三相对称绕组结构。外转子是绕线式三相绕组结构，与传统的转子绕线式发电机结构类似，主要由转子铁心叠片内部嵌入绕组，转子绕组励磁能量来源于静止的 PWM 变频器，通过电刷和滑环引入。内侧为永磁式转子结构，其与绕线式转子之间通过轴承固定在发电机轴上，由自己独立的轴承支撑，任何时候都不带负载，所以其可以绕发电机通过自己的独立轴承转动。

双转子风力发电机正常运行时，永磁内转子和定子之间的结构类似于一台同步发电机。由于永磁内转子的存在可以给气隙磁场提供额外的励磁，因此双转子风力发电机需要的来自 PWM 变频器的励磁电流要比普通双馈发电机的小得多。因为双转子风力发电机转子能够提供一定的励磁能量，因此其定子绕组中的电流相对较小。可见，在一定的转子电流条件下，定子绕组中的电流明显降低，因此这种双转子风力发电机正常运行时较为节能<sup>[24-29]</sup>。



(a) 双转子风力发电机转子剖面图



(b) 双转子风力发电机结构径向图

图 5.1 双转子风力发电机的结构

### 5.1.2 双转子风力发电机在三相静止坐标系中的数学模型

双转子风力发电机的结构相当于绕线式异步电机和永磁同步发电机的叠加。内部可以绕自身轴承自由旋转的转子，可以理解为在发电机磁场中额外增加一个恒定的以同步速运行的磁链量，因为发电机内部气隙长度很小，所以到达内部转子的磁链较大，从绕线式的转子铰链，然后进入定子轭部，这一点可以通过有限元仿真得到验证。Ansoft Maxwell 2D 电磁场发电机内部磁力线分布如图 5.2 所示。不计漏磁的影响，可认为永磁体磁场在发电机中多了一个不变的磁链量。

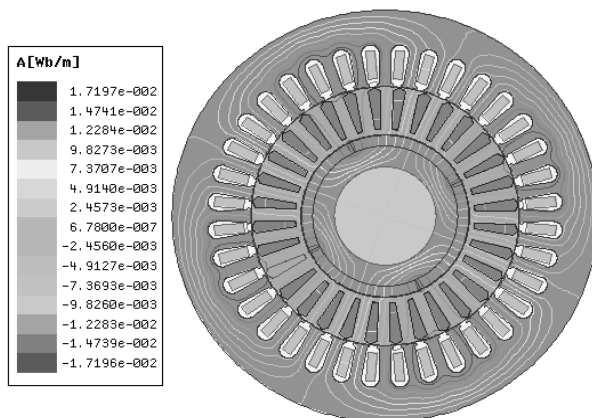


图 5.2 双转子风力发电机的内部磁力线分布

研究双转子风力发电机时，为方便起见，规定：发电机三相绕组彼此相同，忽略磁路非线性，忽略磁饱和和发电机振动消耗的能量，假设铁心没有损耗。双转子风力发电机在三相坐标系中，定子上有相同的三相对称绕组。转子的起始位置由定子侧 A 相轴线和转子侧 a 相轴线的夹角决定。

双转子风力发电机的磁通路径如下：首先磁力线从内部转子轭出发，依次经过永磁材料、内部气隙、外部转子轭、外转子齿、外部气隙，最后到达定子轭和定子齿，最终形成闭合曲线。表 5.1 所示为双转子风力发电机的主要参数。

表 5.1 双转子风力发电机的主要参数

风力发电机参数	尺 寸	风力发电机参数	尺 寸
极对数	2	内转子叠片内径 (mm)	302
定子内径 (mm)	620	内转子叠片外径 (mm)	411
定子外径 (mm)	850	定子槽数	72
铁心长 (mm)	775	矫顽力 (kA/m)	840
外气隙长 (mm)	1.6	剩磁 (T)	1.1
外转子叠片内径 (mm)	445	转子槽数	96
外转子叠片外径 (mm)	614	永磁材料厚度 (mm)	10
内气隙长度 (mm)	0.2	永磁材料长度 (mm)	310

双转子风力发电机样机的参数是，定子和转子铁心叠片都使用 DW315-50 硅钢片。永磁体材料的剩磁和矫顽力对发电机的指标影响非常大，因此通常采用软磁性能及较高的剩磁密度，并且其温度和热稳定性要符合要求。为满足上述要求，采用磁性能较好的 N35UH 钕铁硼材料。

图 5.3 是按照表 5.1 中的指标建立的双转子风力发电机的二维有限元仿真模型。

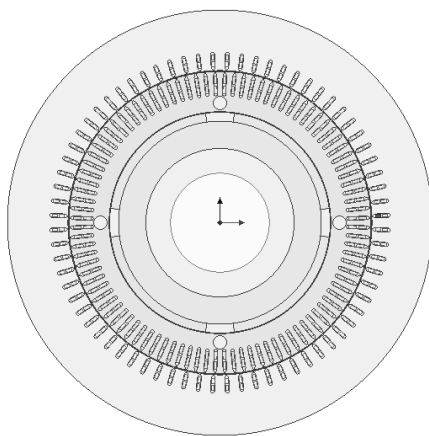


图 5.3 双转子风力发电机的二维有限元仿真模型

双转子风力发电机空载气隙磁场的主要组成为永磁体和绕线励磁绕组。双转子风力发电机的主磁路如图 5.4 所示。

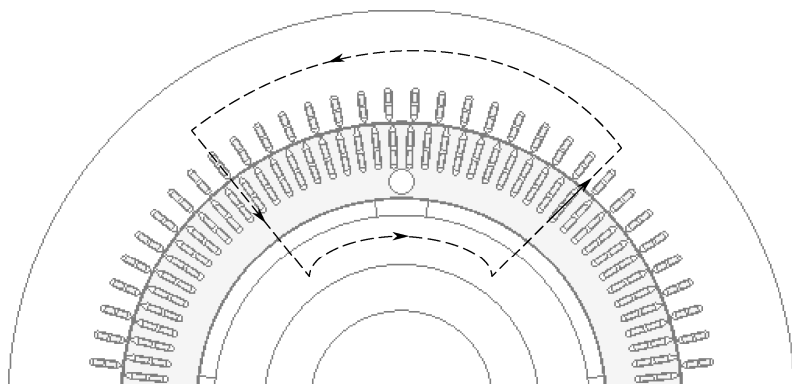


图 5.4 双转子风力发电机的主磁路

空载特性是双转子风力发电机的基本特性。根据双转子风力发电机的基本工作原理可知，转子绕组的电流来源于 RSC，变流器可以实时调节，进而改变电流的频率大小、相位和幅值，因此能够实现对输出电能的功率和能量的调节。首先介绍仿真发电机负载为 0 时，内部磁场分布的情况。此时，定子绕组中无电流流过，将图 5.2 中的电枢绕组中的电流值设为零。对其进行有限元处理时，利用有限元软件自带的网格划分功能自动剖分。发电机整体模型的有限元剖分如图 5.5(a)所示，图 5.5(b)是网格处理后的示意图。在图 5.5 中，定子和转子之间的气隙部分及永磁材料周围，特别是定子、转子极尖和齿边沿处，剖分网格数较集中，因此提高了计算的精度并节约了计算的时间。

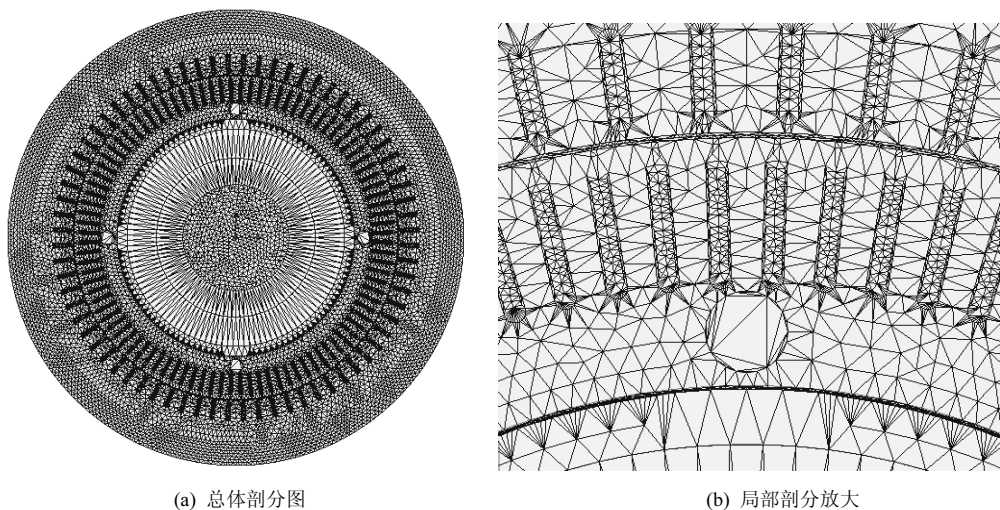


图 5.5 发电机整体模型有限元剖分及局部放大

双转子风力发电机定子、转子绕组提供的励磁电流，以及内部永磁体转子产生的磁场，同时向电机提供励磁能量。为了能够清晰地分析和说明，可以通过有限元仿真进行。仅有永磁体并且绕组未通电时，双转子风力发电机内的磁场分布情况如图 5.6 所示。通入 309A 的励磁电流，永磁体和绕组电流共同励磁时，双转子风力发电机的磁场分布如图 5.7 所示。从图 5.6 可以看出，绕组未通电流的情况下，由永磁体本身产生的磁通绝大部分可以同时铰链定子、转子，气隙磁场不大。



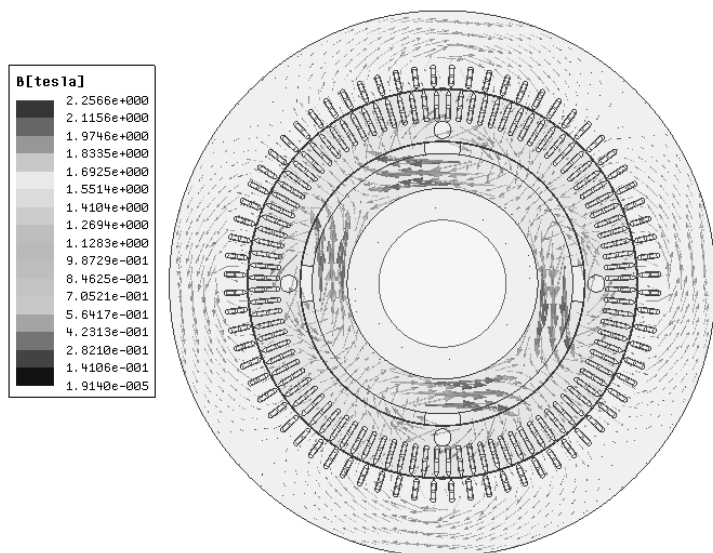


图 5.6 永磁体单独作用时，双转子风力发电机的磁场分布

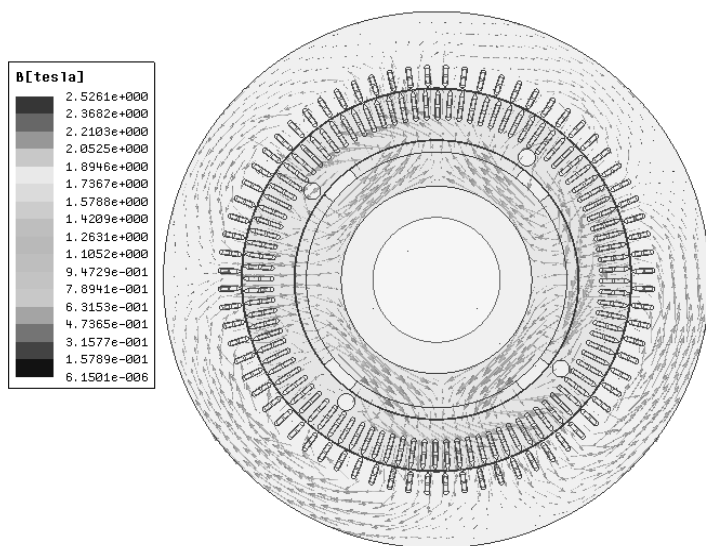


图 5.7 转子励磁电流为 309A 时，双转子风力发电机的磁场分布

从图 5.7 可知，转子绕组中的电流和永磁材料共同作用，建立了双转子风力发电机内部的旋转磁场，磁力线在双转子风力发电机内部形成了闭合的完整磁场曲线。

要研究双转子风力发电系统的控制策略，先要弄清其数学模型，进而利用 MATLAB 建模实现系统在不同状态下的控制策略。首先需要建立在三相坐标中的双转子风力发电机模型。双转子风力发电机的建立模型过程，主要采用等效的坐标变换。为了能够便于对双转子风力发电机的后续控制算法进行研究，可将模型变换到两相同步旋转坐标系下，从而使数学模型大大简化。

在建立双转子风力发电机的数学模型前，应符合如下约定：定子侧参数的正方向遵守发电机的规定，转子侧各参数的正方向遵守电动机的规定。

双转子风力发电机在静止坐标系中的各个参数的表示如图 5.8 所示。

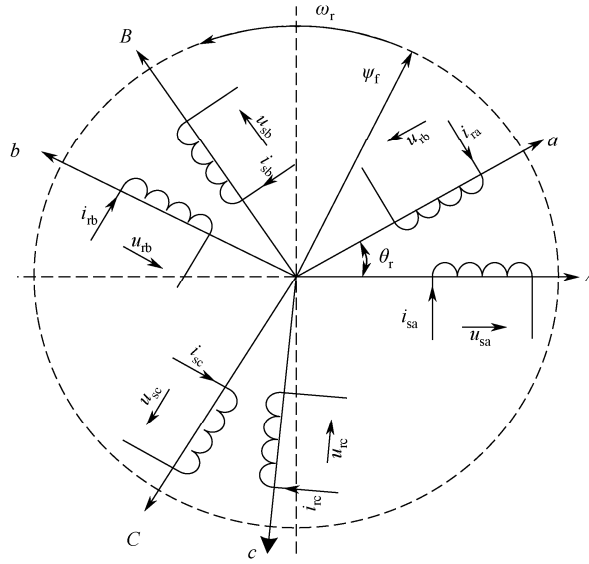


图 5.8 三相坐标系下的发电机参数

从以上分析可知，双转子风力发电机的电压方程为

$$\mathbf{u} = \mathbf{R}\mathbf{i} + p\boldsymbol{\psi} \quad (5.1)$$

式中，各矩阵如下：

$$\begin{aligned} \mathbf{u} &= [u_{sa} \ u_{sb} \ u_{sc} \ u_{ra} \ u_{rb} \ u_{rc}]^T \\ \mathbf{R} &= \text{diag}[r_s \ r_s \ r_s \ r_r \ r_r \ r_r] \\ \mathbf{i} &= [i_{sa} \ i_{sb} \ i_{sc} \ i_{ra} \ i_{rb} \ i_{rc}]^T \\ \boldsymbol{\psi} &= [\psi_{sa} \ \psi_{sb} \ \psi_{sc} \ \psi_{ra} \ \psi_{rb} \ \psi_{rc}]^T \end{aligned}$$

式中， $u_{sa}$ 、 $u_{sb}$  和  $u_{sc}$  分别是定子 ABC 三相的交流电压， $u_{ra}$ 、 $u_{rb}$  和  $u_{rc}$  分别是转子 abc 三相的交流电压， $i_{sa}$ 、 $i_{sb}$  和  $i_{sc}$  分别是定子 ABC 三相的交流电流， $i_{ra}$ 、 $i_{rb}$  和  $i_{rc}$  分别是转子 abc 三相的交流电流， $r_s$  和  $r_r$  分别是定转子侧的每相电阻值， $\psi_{sa}$ 、 $\psi_{sb}$  和  $\psi_{sc}$  分别是定子侧 ABC 三相的磁链， $\psi_{ra}$ 、 $\psi_{rb}$  和  $\psi_{rc}$  分别是转子侧 abc 三相的磁链。

双转子风力发电机转子侧的所有参数都归算至定子侧。 $p$  是微分算子 ( $p = d/dt$ )。磁链方程为

$$\boldsymbol{\psi} = \mathbf{L}\mathbf{i} + \boldsymbol{\psi}_f \quad (5.2)$$

式中， $\boldsymbol{\psi}_f$  为内部绕轴承自由旋转的永磁转子产生的磁链。显然， $\boldsymbol{\psi}_f$  在定子、转子内是一个恒定常数，用矩阵表示为  $\boldsymbol{\psi}_f = [\psi_{saf} \ \psi_{sbf} \ \psi_{scf} \ \psi_{raf} \ \psi_{rbf} \ \psi_{rcf}]^T$ 。

双转子风力发电机的电感矩阵可写为

$$\mathbf{L} = \begin{bmatrix} \mathbf{L}_{ss} & \mathbf{L}_{sr} \\ \mathbf{L}_{rs} & \mathbf{L}_{rr} \end{bmatrix} \quad (5.3)$$

式中， $\mathbf{L}_{ss}$  表示定子的自感，

$$\mathbf{L}_{ss} = \begin{bmatrix} L_{as} & M_{abs} & M_{acs} \\ M_{bas} & L_{bs} & M_{bcs} \\ M_{cas} & M_{cbs} & L_{cs} \end{bmatrix} \quad (5.4)$$

定子侧绕组均布，所以其自感大小相等。同理，互感大小相等：

$$\begin{cases} L_s = L_{ms} + L_{\sigma s} \\ M_s = -\frac{1}{2}L_{ms} \end{cases} \quad (5.5)$$

式中， $L_{ms}$  为定子侧主电感， $L_{\sigma s}$  为定子侧漏电感。

转子电感矩阵  $\mathbf{L}_{rr}$  为

$$\mathbf{L}_{rr} = \begin{bmatrix} L_{mr} + L_{\sigma r} & -\frac{1}{2}L_{mr} & -\frac{1}{2}L_{mr} \\ -\frac{1}{2}L_{mr} & L_{mr} + L_{\sigma r} & -\frac{1}{2}L_{mr} \\ -\frac{1}{2}L_{mr} & -\frac{1}{2}L_{mr} & L_{mr} + L_{\sigma r} \end{bmatrix} \quad (5.6)$$

式中， $L_{mr}$  为转子侧主电感， $L_{\sigma r}$  为转子侧漏电感。

通常情况下，共同产生的磁链也必定铰链定子、转子铁心和绕组本身。通过绕组归算等效，定子和转子相互作用形成的主电感应相同，即  $L_{ms} = L_{mr}$ 。

$\mathbf{L}_{sr}$  和  $\mathbf{L}_{rs}$  是定子和转子相互作用形成的互感变量，其大小会因为定子和转子之间的夹角的不同而改变，即它是关于相对位置角  $\theta_r$  的函数，表示为

$$\mathbf{L}_{sr} = \mathbf{L}_{rs}^T = \mathbf{L}_{ms} \begin{bmatrix} \cos \theta_r & \cos(\theta_r - 120^\circ) & \cos(\theta_r + 120^\circ) \\ \cos(\theta_r + 120^\circ) & \cos \theta_r & \cos(\theta_r - 120^\circ) \\ \cos(\theta_r - 120^\circ) & \cos(\theta_r + 120^\circ) & \cos \theta_r \end{bmatrix} \quad (5.7)$$

式中， $\theta_r$  为定子和转子的相对位置角。可以看出，定子和转子之间的互感大小不再是一个常数，电感矩阵  $\mathbf{L}$  不再是一个常数矩阵。所以，为了简化双转子风力发电机的分析和控制，通常利用坐标变换把非常数的电感矩阵变换为常数矩阵。

双转子风力发电机的电磁转矩可以表示为

$$T_e = \frac{1}{2} \mathbf{i}^T \frac{\partial \mathbf{L}}{\partial \theta} \mathbf{i} \quad (5.8)$$

式中， $\theta$  表示转子的角度。在电感矩阵  $\mathbf{L}$  表达式中，除  $\mathbf{L}_{sr}$  和  $\mathbf{L}_{rs}$  与角位移有关外，其他参数都与角位移无关。故上式展开为

$$T_e = -p \mathbf{i}_{abcs}^T \frac{\partial \mathbf{L}_{sr}}{\partial \theta_r} \mathbf{i}_{abcr} \quad (5.9)$$

式中， $p$  为 NS 磁极的对数， $T_e$  为电磁感应产生的电磁转矩。 $\mathbf{i}_{abcs}$  和  $\mathbf{i}_{abcr}$  分别为定子、转子绕组中的电流。电机机械平衡运动方程为

$$T_e - T_L = J \frac{d\Omega}{dt} \quad (5.10)$$

式中， $T_L$  为负载转矩的大小， $J$  为机械的转动惯量大小； $\Omega$  为运动的角速度，它与电角速度  $\omega_r$  的关系为

$$\omega_r = p\Omega \quad (5.11)$$

可以看出, 双转子风力发电机的方程中变量多, 而且方程是非线性的, 这对双转子风力发电机的分析和控制来说非常不方便, 故在研究中都采用坐标变换法来化简双转子风力发电机本体的数学模型, 进而得到相应的控制方案。

### 5.1.3 双转子风力发电机在两相旋转坐标系中的数学模型

在两相旋转  $dq$  坐标系中,  $d$  轴固定在永磁磁链上。不计漏磁, 永磁体提供的磁场相当于一个恒定的磁链  $\psi_f$ 。双转子风力发电机定子、转子和永磁磁链的向量图如图 5.9 所示。图中各个参数的含义如下:  $\psi_r$  为外转子产生的磁场,  $\psi_s$  为定子绕组产生的磁场,  $\psi_f$  为永磁材料产生的磁场。 $\psi_s$  和  $\psi_r$  之间的夹角为  $\alpha$ ,  $\psi_f$  和  $\psi_r$  之间的夹角为  $\beta$ 。在两相旋转同步坐标系中, 以上三个磁链都同步运行, 在任意正常状态,  $\psi_r$ 、 $\psi_r$  和  $\psi_s$  的大小不变。

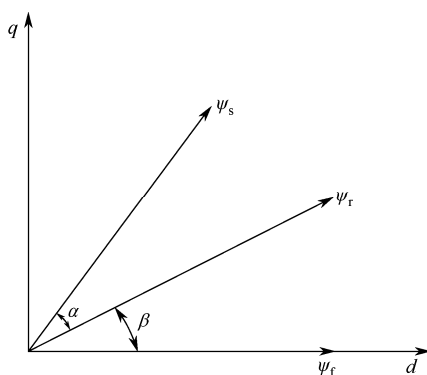


图 5.9 双转子风力发电机磁链向量图

磁链表达式为

$$\begin{cases} \psi_{ds} = -L_s i_{ds} + L_m i_{dr} + \psi_f \\ \psi_{qs} = -L_s i_{qs} + L_m i_{qr} \\ \psi_{dr} = -L_m i_{ds} + L_r i_{dr} + \psi_f \\ \psi_{qr} = -L_m i_{qs} + L_r i_{qr} \end{cases} \quad (5.12)$$

电压表达式为

$$\begin{cases} u_{ds} = p\psi_{ds} - \omega_l \psi_{qs} - R_s i_{ds} \\ u_{qs} = p\psi_{qs} + \omega_l \psi_{ds} - R_s i_{qs} \\ u_{dr} = p\psi_{dr} - \omega_s \psi_{qr} + R_r i_{dr} \\ u_{qr} = p\psi_{qr} + \omega_s \psi_{dr} + R_r i_{qr} \end{cases} \quad (5.13)$$

式中,  $\omega_l$  为同步角速度,  $\omega_r$  为外转子角速度, 两者之差为  $\omega_s = \omega_l - \omega_r$ 。

双转子风力发电机电磁转矩包括  $T_s$ 、外转子转矩  $T_{OR}$  和内转子转矩  $T_{IR}$ :

$$\begin{cases} T_s = \frac{3}{2} p (i_{ds} \psi_{qs} - i_{qs} \psi_{ds}) \\ T_{OR} = \frac{3}{2} p (i_{dr} \psi_{qr} - i_{qr} \psi_{dr}) \\ T_{IR} = T_s - T_{OR} \end{cases} \quad (5.14)$$

永磁转子空载, 其电磁转矩除克服转子轴上的摩擦外, 负载转矩为零, 所以可得永磁转子的转矩表达式为

$$J_{\text{IR}} \frac{d\Omega_{\text{IR}}}{dt} = T_{\text{IR}} - T_{\text{O}} \quad (5.15)$$

外转子是驱动双转子风力发电机的运动转子, 其电磁转矩除克服转子轴上的摩擦外, 还要平衡负载转矩, 所以可得外转子的转矩表达式为

$$J_{\text{OR}} \frac{d\Omega_{\text{OR}}}{dt} = T_{\text{L}} - T_{\text{OR}} \quad (5.16)$$

### 5.1.4 双转子风力发电机在任意旋转坐标系中的数学模型

两相旋转坐标系是任意旋转坐标系的特殊情形。对于任意旋转坐标系特别是对于常用坐标变化的应用研究, 在双转子风力发电机控制策略的使用和实践方面, 实用性很强。

如果转子的角速度是  $\omega$ ,  $d$  轴与定子 A 相轴线的夹角是  $\theta_s$ ,  $d$  轴与转子 a 相轴线的夹角是  $\theta_r$ , 那么  $\theta_s$  与  $\theta_r$  的关系为

$$\begin{cases} \theta_s = \int \omega(t) dt + \theta_{s0} \\ \theta_r = \int (\omega(t) - \omega_r(t)) dt + \theta_{r0} \end{cases} \quad (5.17)$$

式中,  $\theta_{s0}$  为  $d$  轴与定子 A 相在起始零时刻的夹角,  $\theta_{r0}$  为  $d$  轴与发电机转子 a 相绕组轴线在起始零时刻的夹角。它们的差值  $\theta_r = \theta_{s0} - \theta_{r0}$  与选取的转子在零时刻的位置有关。

在工程实际中常采用以下两种变化矩阵: 第一种是相幅值变换, 第二种是恒功率变换。三相到任意转速坐标系的变换可记为

$$C_{\text{ABC/dq}} = \begin{bmatrix} \cos \theta_s & \cos(\theta_s - 120^\circ) & \cos(\theta_s + 120^\circ) \\ -\sin \theta_s & -\sin(\theta_s - 120^\circ) & -\sin(\theta_s + 120^\circ) \end{bmatrix} \quad (5.18)$$

$$C_{\text{abc/dq}} = \begin{bmatrix} \cos \theta_r & \cos(\theta_r - 120^\circ) & \cos(\theta_r + 120^\circ) \\ -\sin \theta_r & -\sin(\theta_r - 120^\circ) & -\sin(\theta_r + 120^\circ) \end{bmatrix} \quad (5.19)$$

在任意转速坐标系下, 双转子风力发电机的电压表达式为

$$\begin{cases} u_{\text{ds}} = r_s i_{\text{ds}} + p\psi_{\text{ds}} - \omega\psi_{\text{qs}} \\ u_{\text{qs}} = r_s i_{\text{qs}} + p\psi_{\text{qs}} - \omega\psi_{\text{ds}} \\ u_{\text{dr}} = r_r i_{\text{dr}} + p\psi_{\text{dr}} - (\omega - \omega_r)\psi_{\text{qr}} \\ u_{\text{qr}} = r_r i_{\text{qr}} + p\psi_{\text{qr}} - (\omega - \omega_r)\psi_{\text{dr}} \end{cases} \quad (5.20)$$

式中, 下标为 ds 的量是定子侧  $d$  轴参数, 下标为 qs 的量是定子侧  $q$  轴参数, 下标为 dr 的量是转子侧  $d$  轴参数, 下标为 qr 的量是转子侧  $q$  轴参数。磁链表达式为

$$\begin{cases} \psi_{\text{ds}} = L_s i_{\text{ds}} + L_m i_{\text{qs}} + \psi_{\text{dsf}} \\ \psi_{\text{qs}} = L_s i_{\text{qs}} + L_m i_{\text{ds}} + \psi_{\text{qsf}} \\ \psi_{\text{dr}} = L_r i_{\text{dr}} + L_m i_{\text{qr}} + \psi_{\text{drf}} \\ \psi_{\text{qr}} = L_r i_{\text{qr}} + L_m i_{\text{dr}} + \psi_{\text{qrf}} \end{cases} \quad (5.21)$$

式中,  $L_m$  为定子和转子互感。  $L_m$  可表示为

$$L_m = \frac{3}{2} L_{ms} \quad (5.22)$$

$L_s$  为定子  $dq$  轴方向之间的自感,  $L_s = L_{\sigma s} + \frac{3}{2} L_{ms}$ ;  $L_r$  是转子  $dq$  轴方向之间的自感,  $L_r = L_{\sigma r} + \frac{3}{2} L_{ms}$ 。

按照坐标变换理论, 两相坐标系的互感转化为三相坐标系的互感时, 要利用它们之间的 3/2 倍关系。

式(5.21)中,  $\psi_f$  为永磁磁链, 它是双转子风力发电机区别于普通双馈风力发电机的显著特征。如图 5.10 所示, 设  $\psi_f$  与  $d$  轴之间的夹角为  $\theta_\varphi$ , 则有

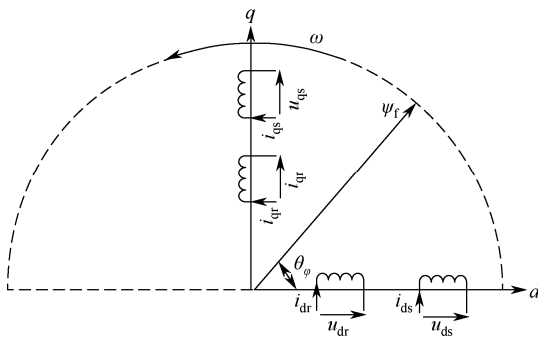


图 5.10 同步速坐标系中的电压和电流

$$\theta_\varphi = \int (\omega(t) - \omega_0(t)) dt + \theta_{\varphi 0} \quad (5.23)$$

式中,  $\theta_{\varphi 0}$  是起始时刻的角度。永磁磁链  $\psi_f$  在  $dq$  轴上的表达式为

$$\begin{cases} \psi_{ds0} = \psi_{dr0} = \psi_f \cos \theta_\varphi \\ \psi_{qs0} = \psi_{qr0} = \psi_f \sin \theta_\varphi \end{cases} \quad (5.24)$$

由式(5.24)可知, 选定旋转坐标系的速度与双转子风力发电机的同步速  $\omega_1$  相等时, 永磁磁链的  $dq$  轴分量不变。

电磁转矩为

$$T_e = p L_m (i_{qs} i_{dr} - i_{ds} i_{qr}) \quad (5.25)$$

运动方程与三相静止坐标系中的表达式完全相同。

## 5.2 双转子风力发电系统的稳态并网控制研究

### 5.2.1 双转子风力发电系统转子侧变换器相量控制

双转子风力发电系统几乎均由双 PWM 背靠背变换器调节, 如图 5.11 所示。为实现对双转子风力发电机的有效控制, 必须对 RSC 和双转子风力发电机进行分析, 进而确定 RSC 的控制策略。

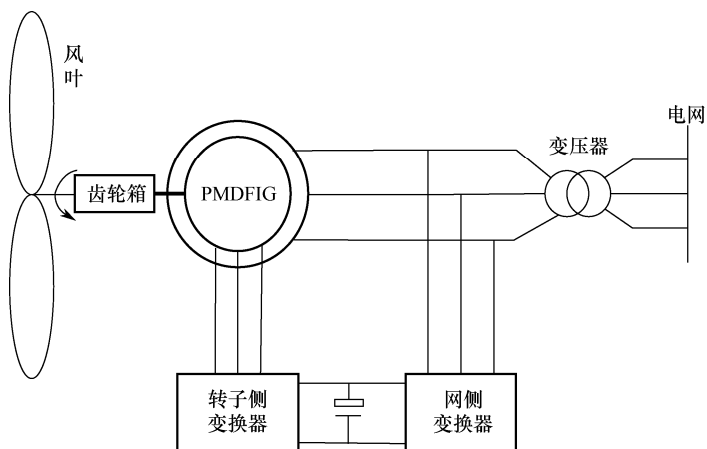


图 5.11 双转子风力发电系统组成示意图

因为双转子风力发电机的定子直接连到电网，其定子电压和频率不变，因此采用基于定子电压的定向相量（SVO）调节措施，对双转子风力发电机在对称系统条件下进行并网控制。对称电力系统的三相交流电压、电流及其产生的磁链除正序分量外，其他相序的分量为零。

电网平稳运行时，对双转子风力发电系统的 RSC 采用 SVO 相量进行控制，将  $d$  轴设定为定子电压方向，则  $q$  轴电压分量为零，可以很容易实现 RSC 侧有功功率和无功功率的独立控制。

$d$  轴设定在定子轴的电压方向时， $u_{qs} = 0$ 。双转子风力发电机和电网系统正常运行时，双转子风力发电机的定子电压保持恒定，即  $pu_{ds} = 0$ 。同时，双转子风力发电机  $dq$  轴方向的磁链亦恒定，易得到双转子风力发电机定子电压表达式为

$$\begin{cases} u_{ds} = -\omega_l \psi_{qs} - R_s i_{ds} \\ u_{qs} = \omega_l \psi_{ds} - R_s i_{qs} = 0 \end{cases} \quad (5.26)$$

双转子风力发电机正常运行时，定子中流过的电流频率为工频 50Hz，此时可以近似认为定子电抗比定子绕组电阻在数值上大得多（即与电抗相比定子绕组的电阻大小可不计），有

$$\begin{cases} i_{ds} = \frac{L_m}{L_s} i_{dr} + \frac{1}{L_s} \psi_f \\ i_{qs} = \frac{L_m}{L_s} i_{qr} + \frac{u_{ds}}{\omega_l L_s} \end{cases} \quad (5.27)$$

功率方程为

$$\begin{cases} P = u_{ds} i_{ds} + u_{qs} i_{qs} = u_{ds} \left( \frac{L_m}{L_s} i_{dr} + \frac{1}{L_s} \psi_f \right) \\ Q = u_{qs} i_{ds} + u_{ds} i_{qs} = u_{ds} \left( \frac{L_m}{L_s} i_{qr} + \frac{u_{ds}}{\omega_l L_s} \right) \end{cases} \quad (5.28)$$

可知，平均功率  $P$  和转子  $d$  轴电流有关，无功功率  $Q$  和转子  $q$  轴电流有关。从上式中

可以看出, 能够完成  $P$  和  $Q$  在  $d$  轴方向和  $q$  轴方向的独立双轴调节。

由式(5.12)和式(5.34)可得转子电压方程为

$$\begin{cases} u_{dr} = R_r i_{dr} + \frac{L_r L_s - L_m^2}{L_s} p i_{dr} - \omega_s \psi_{qr} = R_r i_{dr} + \frac{L_r L_s - L_m^2}{L_s} p i_{dr} + \Delta u_{dr} \\ u_{qr} = R_r i_{qr} + \frac{L_r L_s - L_m^2}{L_s} p i_{qr} + \omega_s \psi_{dr} = R_r i_{qr} + \frac{L_r L_s - L_m^2}{L_s} p i_{qr} + \Delta u_{qr} \end{cases} \quad (5.29)$$

SVO 相量控制可对转子  $dq$  轴电压分量  $u_{dr}$ 、 $u_{qr}$  分别独立调节, 电压项  $\Delta u_{dr}$ 、 $\Delta u_{qr}$  是用来调节转子电压相互影响的反馈量。可知, 采用 SVO 相量控制方式和相应的坐标变换, 转子电流的有功分量和无功分量可以独立调节, 进而可以对发电机有功和无功分别进行调节。

正常运行时, 由于电网电压恒定不变, 对双转子风力发电机的控制较为简单。图 5.12 显示了对双转子风力发电系统的 RSC 采用传统的定子电压定向相量控制方式, 其中主要采用双闭环的 PI 控制方案。

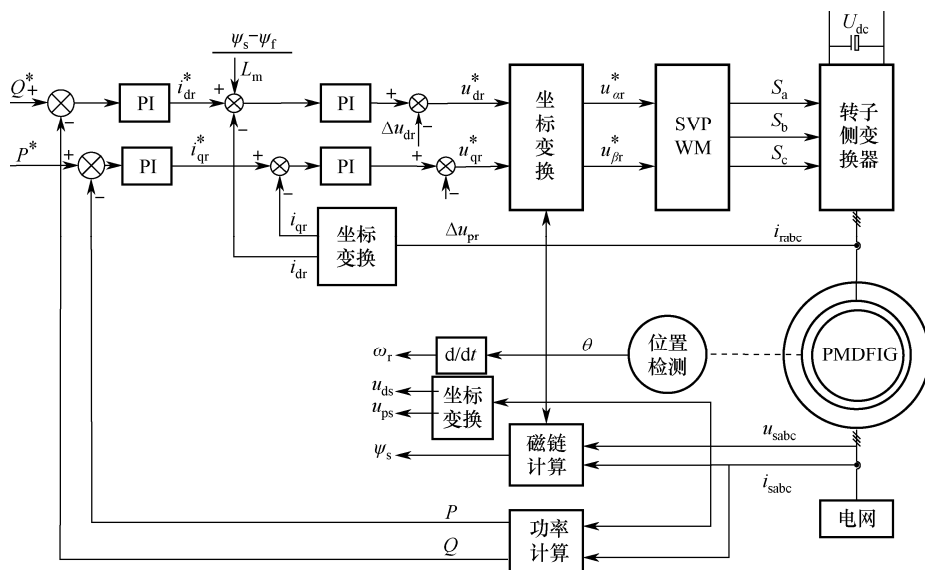


图 5.12 双转子风力发电系统 SVO 相量控制传统方案

图 5.12 中, PI 是比例和积分环节; 上标\*是变量给定值;  $u_{\alpha r}$ 、 $u_{\beta r}$  分别是转子电压的  $\alpha$  轴和  $\beta$  轴电压分量;  $U_{dc}$  是电容器两端的电压;  $i_{sabc}$  是网侧定子绕组电流;  $i_{rabc}$  是转子侧绕组电流;  $u_{sabc}$  是网侧系统电压; SVPWM 是空间脉冲调节装置;  $S_a$ 、 $S_b$ 、 $S_c$  是电流开关量。

### 5.2.2 双转子风力发电机的稳态运行研究

双转子风力发电机的自身结构要求我们研究发电机内部的复杂电磁关系。首先要弄清电磁场的分布特征, 此时可使用 Ansoft 有限元电磁场仿真软件。仿真的大致步骤和参数设置如下所示。

图 5.13 是 RMxpert 定子基本参数设置。



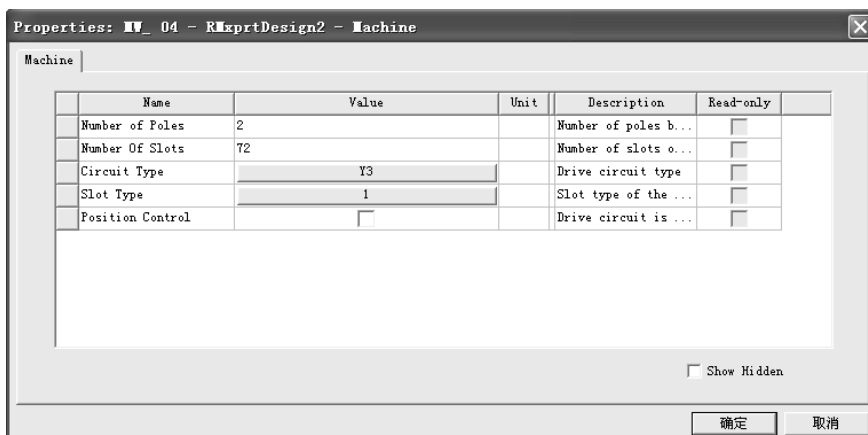


图 5.13 RMxprt 定子基本参数设置

图 5.14 是 RMxprt 定子铁心参数设置。

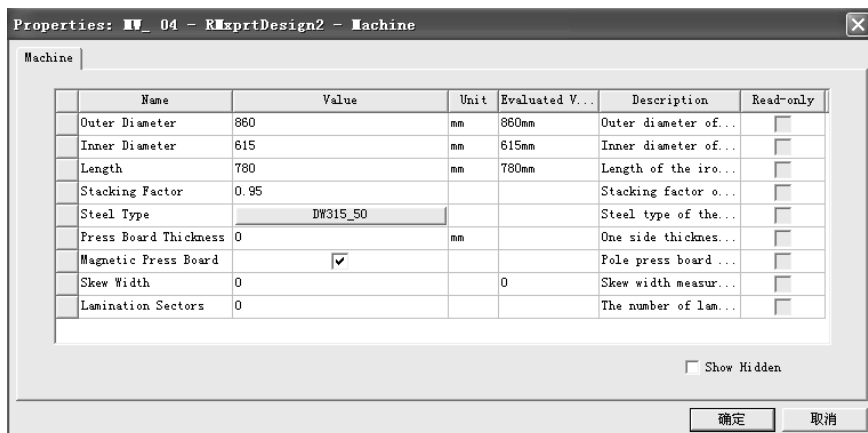


图 5.14 RMxprt 定子铁心参数设置

图 5.15 是 RMxprt 定子绕组参数设置。

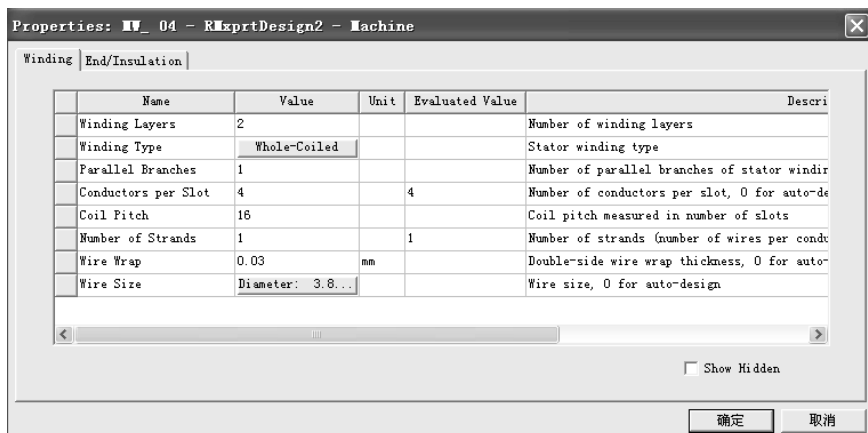


图 5.15 RMxprt 定子绕组参数设置

图 5.16 是 RMxpirt 生成的定子有限元模型。

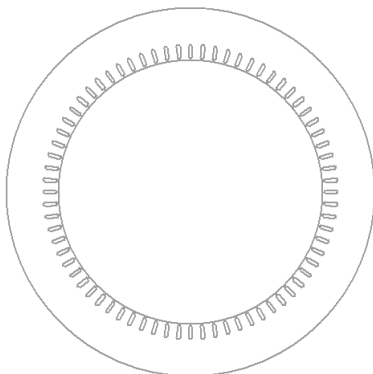


图 5.16 RMxpirt 生成的定子有限元模型

图 5.17 是 RMxpirt 转子基本参数设置。

Properties: MW\_04 - RMxpirtDesign2 - Machine

Machine

Name	Value	Unit	Evaluated V...	Description	Read-only
Number of Poles	2			Number of poles b...	<input type="checkbox"/>
Number Of Slots	96			Number of slots o...	<input type="checkbox"/>
Circuit Type	Y3			Drive circuit type	<input type="checkbox"/>
Slot Type	2			Slot type of the ...	<input type="checkbox"/>
Position Control	<input type="checkbox"/>			Drive circuit is ...	<input type="checkbox"/>

☐ Show Hidden

确定 取消

图 5.17 RMxpirt 转子基本参数设置

图 5.18 是 RMxpirt 转子铁心参数设置。

Properties: MW\_04 - RMxpirtDesign2 - Machine

Machine

Name	Value	Unit	Evaluated V...	Description	Read-only
Outer Diam...	611.4	mm	611.4mm	Outer diameter of...	<input type="checkbox"/>
Inner Diam...	200	mm	200mm	Inner diameter of...	<input type="checkbox"/>
Length	780	mm	780mm	Length of the iro...	<input type="checkbox"/>
Stacking F...	0.95			Stacking factor o...	<input type="checkbox"/>
Steel Type	DW315_50			Steel type of the...	<input type="checkbox"/>
Press Boar...	0	mm		One side thicknes...	<input type="checkbox"/>
Magnetic P...	<input checked="" type="checkbox"/>			Pole press board ...	<input type="checkbox"/>
Skew Width	0		0	Skew width measur...	<input type="checkbox"/>
Lamination...	0			The number of lam...	<input type="checkbox"/>

☐ Show Hidden

确定 取消

图 5.18 RMxpirt 转子铁心参数设置

图 5.19 是 RMXprt 转子绕组参数设置。

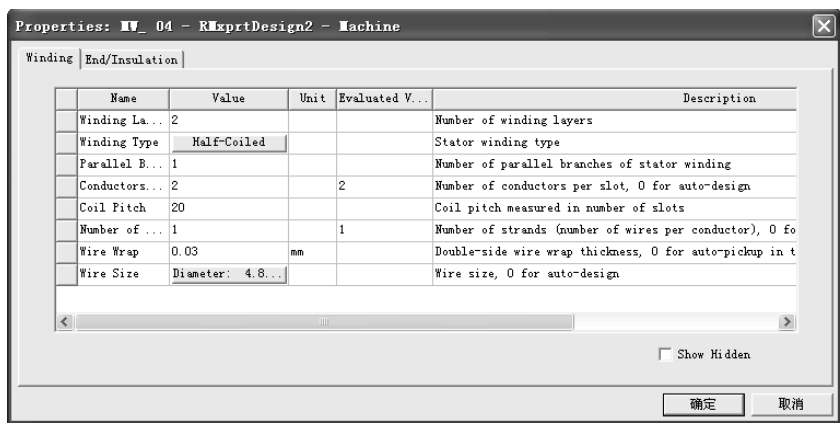


图 5.19 RMXprt 转子绕组参数设置

图 5.20 是 RMXprt 生成的转子有限元模型，图 5.21 是 RMXprt 生成的发电机模型。

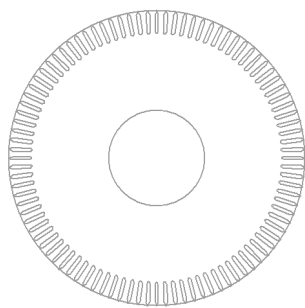


图 5.20 RMXprt 生成的转子有限元模型

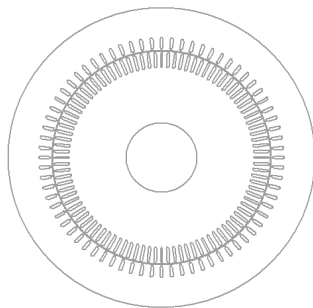


图 5.21 RMXprt 生成的发电机模型

双转子风力发电机的 Maxwell 2D 模型如图 5.22 所示。

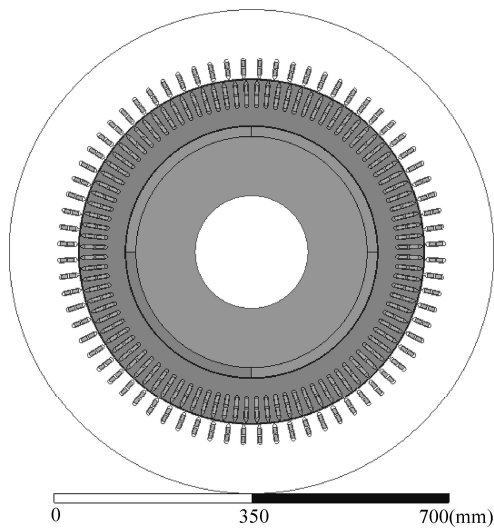


图 5.22 双转子风力发电机的 Maxwell 2D 模型

这里采用有限元法对双转子风力发电机仿真，以便获得发电机各变量的数值：额定功率为 1.5MW，定子额定电压为 690V，定子电阻标么值为 0.02pu，转子电阻标么值为 0.008pu，互感标么值为 2.8pu，永磁磁链标么值为 0.4pu，定子漏感标么值为 0.16pu，转子漏感标么值为 0.2pu，定子和转子匝数之比为 0.4。由双转子风力发电机组成的发电系统如图 5.23 所示。

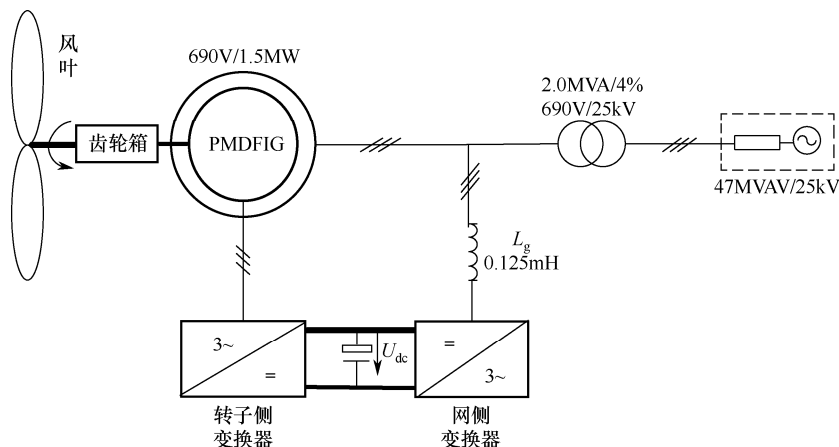


图 5.23 双转子风力发电机发电系统的结构

在动态仿真设定中，让系统电压维持恒定，设输出平均功率为 1，无功功率为 0。可以建立如图 5.12 所示的基于 SVO 的发电机系统相量控制方式下的动态仿真模型，功率仿真具体结果如图 5.24 所示。

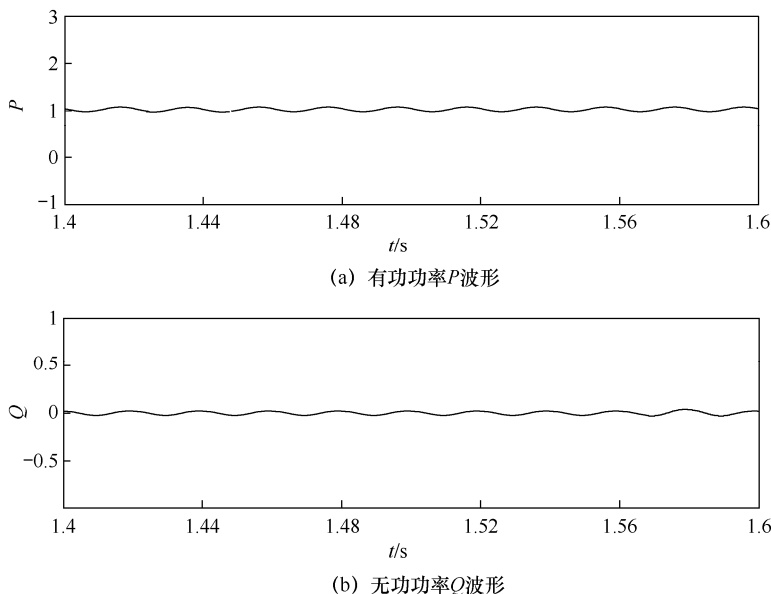


图 5.24 双转子风力发电机采用 SVO 控制方式的功率波形

由图 5.24(a)所示的有功功率曲线可以看出，发电机有功功率的波动一直维持在 1.0pu 左右，能够达到有功功率基本稳定的控制要求；图 5.24(b)是无功功率变化的情况，发电机无功功率的波动也能够保持基本稳定，即波动维持在 0pu 左右。

双转子风力发电机转子侧  $d$  轴方向和  $q$  轴方向的电流变化曲线如图 5.25 所示。

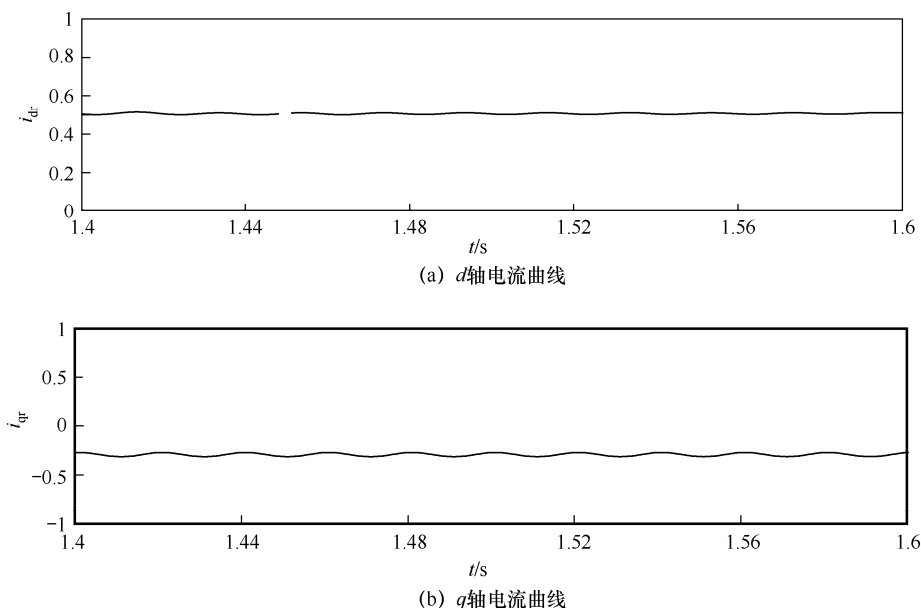


图 5.25 双转子风力发电机 SVO 控制方式下转子侧电流曲线

由图 5.25 中可知，双转子风力发电机具备普通永磁发电机与常规双馈发电机结构的长处，能够进行变速恒频恒压运行。

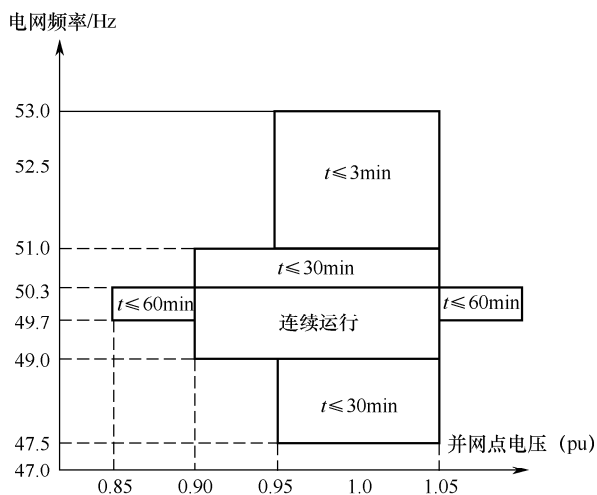
### 5.3 电网电压骤降故障状态下双转子风力发电机的控制策略

目前风电场接入电网的标准，各国的规定并不一致。各个国家根据自身的情况制定了与风电机组相关的输电网技术规范。图 5.26(a)所示为北欧的输电网技术规范，图 5.26(b)所示为德国 EON 公司的标准，而图 5.26(c)是我国风电接入电网的技术规定（修订稿），各图中  $t$  表示风电场的运行时间。

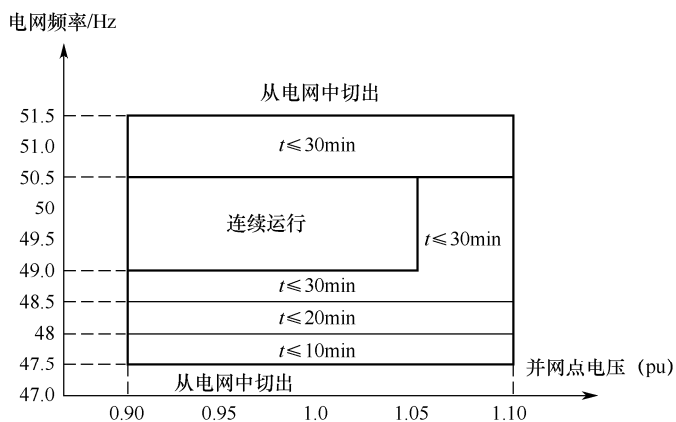
由图 5.26 可知，北欧对风力发电机并网的规定最为严格，频率范围为 47.5~53Hz，运行电压标幺值为 0.85~1.1pu；EON 公司要求风电机组的运行频率为 47.5~51.5Hz，运行电压标幺值为 0.9~1.1pu；我国要求风电机组的运行频率为 48~51Hz，运行电压标幺值为 0.9~1.1pu，超出则会将风电系统从电网中切出。

图 5.27 是对风电机组低电压穿越的要求，并假定故障前并网点电压为额定值，发电机输出额定有功功率。电网侧发生最严重的三相对称接地短路时，在图 5.27(b)中德国 EON 公司的规定比较严格。我国允许并网点电压最低为 0.2pu，而北欧和德国允许并网点电压消失并持续很短的时间。

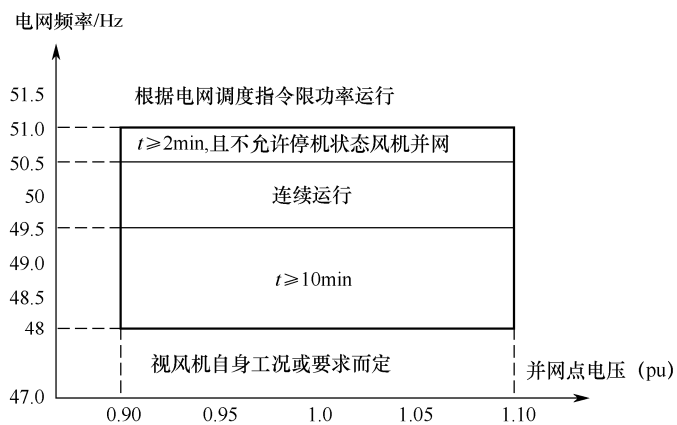
由于在我国目前的能源使用量中风能的比重相对较低，而电网要有自己的适应能力，这样才能处理未预期的干扰所带来的影响，因此我国规定的一些标准值较低，但随着我国风电在电网中的份额不断扩大，风电接入电力系统的标准会不断提高。



(a) 北欧输电网技术规范



(b) 德国EON公司输电网技术规范



(c) 我国风电接入电网技术规定 (修订稿)

图 5.26 风电(场)机组电压、频率运行区域比较

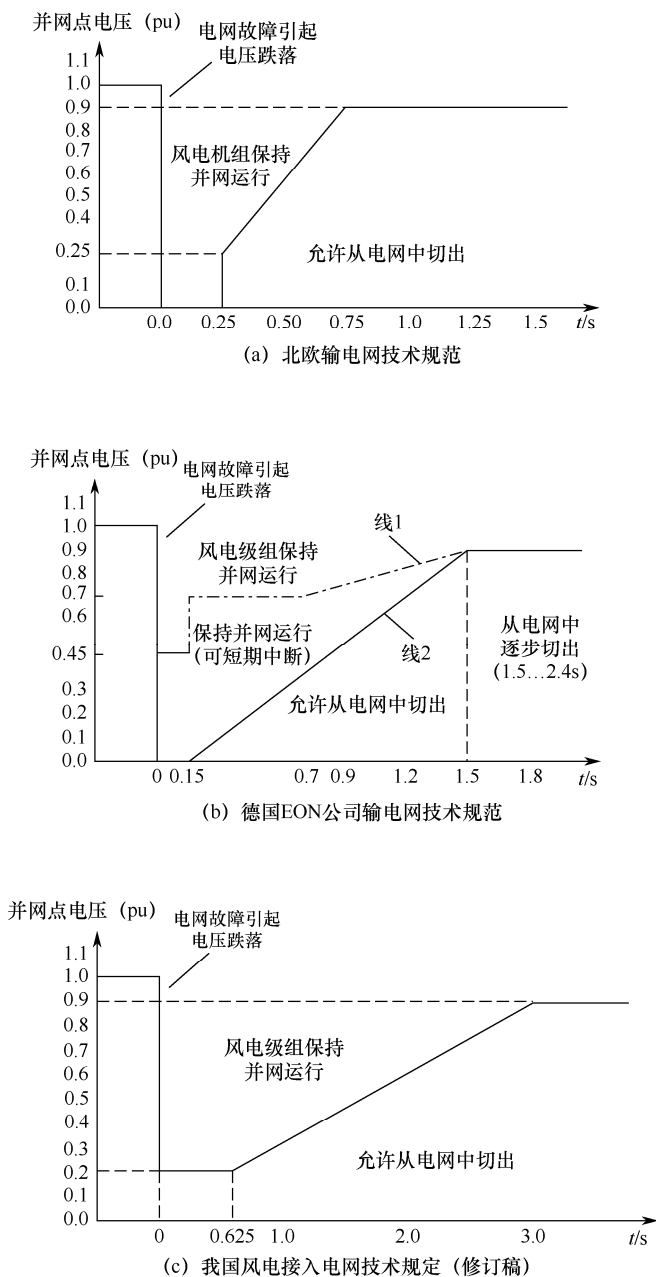


图 5.27 风电(场)机组的低电压穿越要求

### 5.3.1 电压骤降故障状态下转子侧变换器控制策略

相关供电规范规定, 风力发电系统应具有在三相电网电压突然降落时短时间内保证可靠并网的能力, 此时单靠发电机的自身调节能力显然难以实现, 因此必须采取相应的措施。目前常见的措施有定子磁链定向和定子电压定向两种, 因为定子磁链的观测不能达到一定的精度, 控制效果不理想, 故本章利用定子电压定向来研究故障时风力发电机的控制措施。

双转子风力发电系统的 RSC 采用 SVO 相量控制手段来进行, 即把  $d$  轴固定在定子电压

方向, 这时  $q$  轴电压为零, 据此来完成转子 RSC 功率的解耦。

三相交流电网电压降落故障时, 要求风电系统保持运行且并网稳定可靠, 直到电网故障清除。利用反馈控制原理, 即将双转子风力发电机定子励磁电流动态过程反馈到控制器输入端, 可以构建较为精确的数学模型, 以此来对风力发电系统采取有效的控制。

基于同步旋转坐标系, 双转子风力发电机的电压方程为

$$\begin{cases} u_s = -R_s i_s + p\psi_s + j\omega_s \psi_s \\ u_r = R_r i_r + p\psi_r + j\omega_s \psi_r \end{cases} \quad (5.30)$$

磁链方程为

$$\begin{cases} \psi_s = -L_s i_s + L_m i_r + \psi_f \\ \psi_r = -L_m i_s + L_r i_r + \psi_f \end{cases} \quad (5.31)$$

设定子励磁电流的等效值为

$$i_{m0} = \frac{\psi_s}{L_m} = \frac{L_s}{L_m} i_s + i_r \quad (5.32)$$

因为  $L_m$  和  $L_s$  的比值近似相等, 依据式(5.31)和式(5.32)能够写出转子磁链为

$$\psi_r = -\psi_s + \left( \frac{L_m^2}{L_s} - L_r \right) i_r + \psi_f = -\frac{L_m^2}{L_s} i_{m0} + \left( L_r + \frac{L_m^2}{L_s} \right) i_r + 2\psi_f \quad (5.33)$$

考虑式(5.31)、式(5.33)和式(5.30)有

$$\begin{cases} u_s = -R_s i_s + L_m \frac{di_{m0}}{dt} + j\omega_s \psi_s \\ u_r = R_r i_r + j\omega_s \psi_r - \frac{L_m^2}{L_s} \frac{di_{m0}}{dt} + \left( L_r + \frac{L_m^2}{L_s} \right) \frac{di_r}{dt} \end{cases} \quad (5.34)$$

式中,

$$\frac{di_{m0}}{dt} = \frac{1}{L_m} (u_s - R_s i_s - j\omega_s \psi_s) \quad (5.35)$$

将式(5.35)代入式(5.34), 得转子电压方程为

$$u_r = \left( L_r + \frac{L_m^2}{L_s} \right) \frac{di_r}{dt} + \left[ R_r + j\omega_s \left( \frac{L_m^2}{L_s} - L_r \right) \right] i_r - j\omega_s \psi_s - (u_s + R_s i_s - j\omega_s \psi_s) + j\omega_s \psi_f \quad (5.36)$$

采用 SVO 相量控制方法,  $d$  轴电压和系统电压相等, 那么  $q$  轴电压值是 0。得

$$\begin{cases} u_{dr} = R_r i_{dr} + \left( L_r + \frac{L_m^2}{L_s} \right) p i_{dr} + \Delta u_{dr} + \Delta u'_{dr} \\ u_{qr} = R_r i_{qr} + \left( L_r + \frac{L_m^2}{L_s} \right) p i_{qr} + \Delta u_{qr} + \Delta u'_{qr} \end{cases} \quad (5.37)$$

式中,

$$\begin{cases} \Delta u'_{dr} = -u_s + R_s i_{sd} - \omega_s \psi_{sq} \\ \Delta u'_{qr} = -R_s i_{sq} - \omega_s \psi_{sd} \end{cases}$$

可知, 定子励磁电流反馈状态下的 SVO 控制, 在采用定子励磁电流修正时, 能够提升电网电压降低情况下的调节性能。

双转子风力发电机的表达式中存在永磁体的作用, 因此考虑了定子励磁电流变化的电



压定向调节方式如图 5.28 所示。

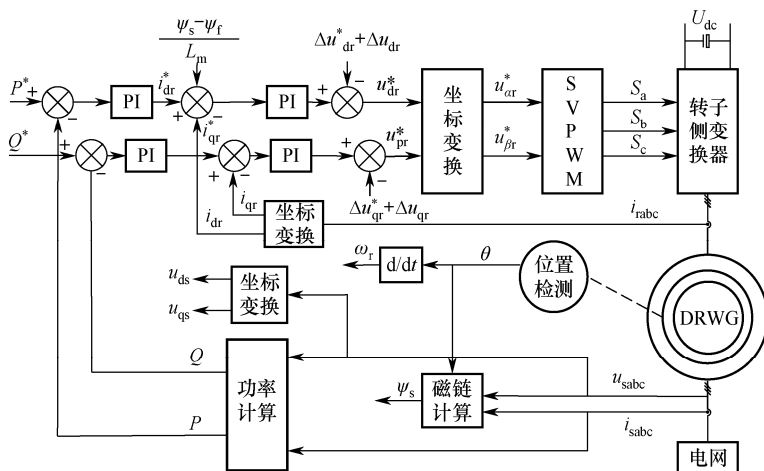


图 5.28 定子励磁电流反馈下双转子风力发电系统的 SVO 控制

图 5.28 中，PI 是比例和积分环节，上标\*是变量给定值。 $u_{ar}$ 、 $u_{br}$  分别是转子电压在  $\alpha$  轴和  $\beta$  轴的电压分量， $U_{dc}$  是电容器两端的电压， $i_{sabc}$  是网侧定子绕组电流， $i_{rabc}$  是转子侧绕组电流， $u_{sabc}$  是网侧系统电压，SVPWM 是空间脉冲调节装置， $S_a$ 、 $S_b$ 、 $S_c$  是电流开关量。

综上所述，可以得到实施负载电流前馈和电网电压前馈两者双闭环的 GSC 综合协调控制方式，如图 5.29 所示。

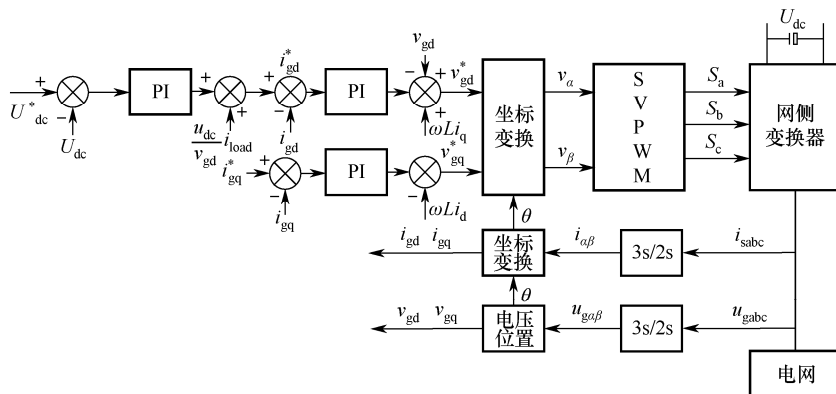


图 5.29 网侧直流电压和电流的双闭环 GSC 综合协调控制

由图 5.29 可知，要想将  $d$  轴电流和  $q$  轴电流完全解耦，可以采取电流的反馈来实现。要使电网电压的扰动得到控制，可对电压进行前馈控制来实现。同样，对于负载来说，负载的扰动也要使用负载电流的前馈控制来实现。

要想维持直流电容器上的电压  $U_{dc}$  恒定，应确保由 GSC 输入的瞬时有功功率  $P_{gc}$  等于转子侧的瞬时有功功率  $P_{cr}$ ，即  $P_{gc} = P_{cr}$ 。此时有

$$P_{gc} = v_a i_a + v_b i_b + v_c i_c = v_d i_d + v_q i_q = v_d i_d = v_{ra} i_{ra} + v_{rb} i_{rb} + v_{rc} i_{rc} = P_{cr} = u_{dc} i_{load} \quad (5.38)$$

### 5.3.2 电网电压突降时双转子风力发电系统改进调节研究

将反馈的定子电流变化的调节方程用于发电机控制，在 MATLAB 中搭建模型，模拟电力系统电压降落时双转子风力发电机的动态 Simulink 模型，对额定容量为 1.5MW 的双转子风力发电机进行了动态运行。设定电机稳定运行  $t = 1\text{s}$ ，此时电压降落故障发生，即电网电压标幺值从 1.0pu 突然降到标准值 0.85pu，持续时间  $t = 0.3\text{s}$ 。采用 SVO 相量控制策略并网分析瞬态特性。两种调节措施的输出曲线如图 5.30 所示。

可知，两种定向方式下传统相量控制对于电网电压降落故障发生及恢复时刻均有相似的动态响应，而改进方案的响应过程也很类似。

由图 5.30(a)可知，改进控制方案下转子电流波动的幅值比传统控制方案下小得多，这说明改进的方案可以对转子电流实现较好的控制，降低了故障期间电机转子及 RSC 的过电流冲击。

由图 5.30(b)可知，改进的控制方案可以减小电网电压故障时定子、转子电流的小幅波动，实施调节后可以维持故障期间定子、转子不发生过电流的情况。

由图 5.30(c)可知，传统的相量控制能够有效调节发电机输出的有功功率，但有较大的变动，这对  $U_{dc}$  的波动的抑制不利。改进方案下的功率波动较小，基本恒定，可以很好地维护直流母线电压不变。

由图 5.30(d)可知，改进的调节方式可以达到削弱无功功率变动的目的，故障前后都能够保证无功功率稳定。

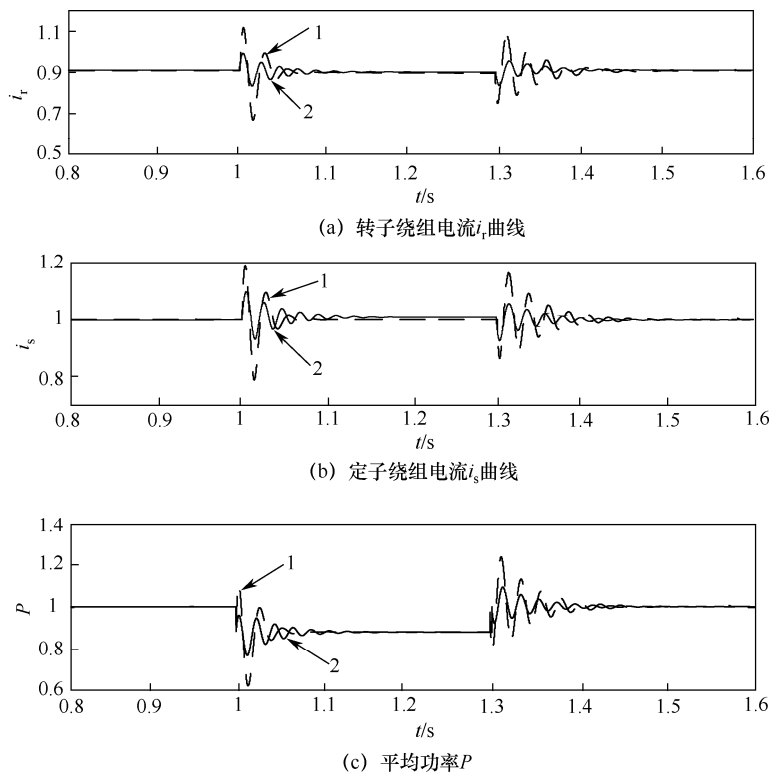
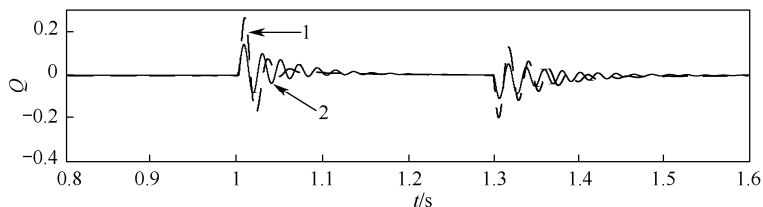


图 5.30 电压下降时，双转子风力发电系统传统与改进算法的 SVO 控制仿真曲线


 (d) 无功功率 $Q$ 

1—传统控制, 2—改进控制

图 5.30 电压下降时, 双转子风力发电系统传统与改进算法的 SVO 控制仿真曲线 (续)

### 5.3.3 电压降落时双转子风力发电系统动态仿真

对双转子风力发电系统进行了瞬态仿真, 系统故障情况下使得电压降低, 仿真运行的曲线如图 5.31 所示。

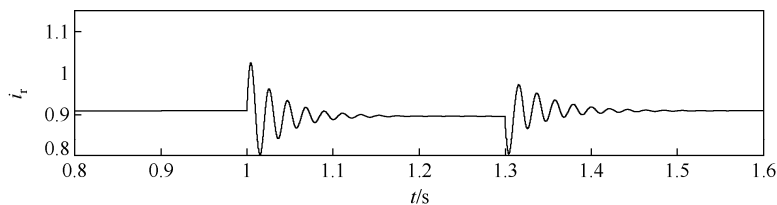
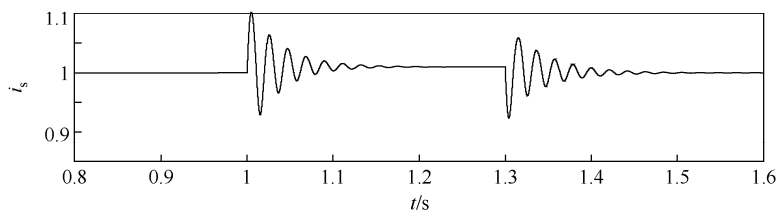
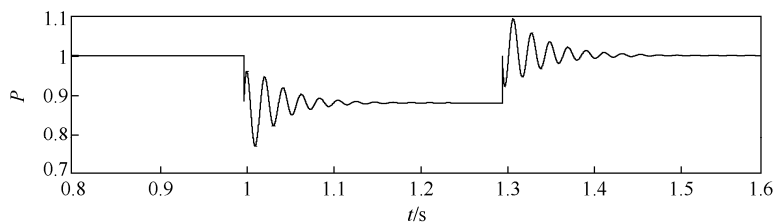
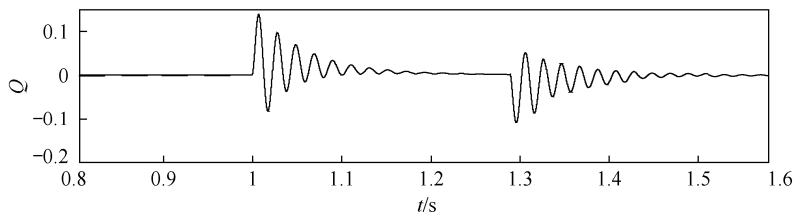

 (a) 转子绕组电流 $i_r$ 

 (b) 定子绕组电流 $i_s$ 

 (c) 平均功率 $P$ 

 (d) 无功功率 $Q$ 

图 5.31 系统电压突然降落故障时双转子风力发电系统仿真结果

由图 5.31(a)~(d)可以看出, 双转子风力发电系统在电网电压降落时, 通过传统的相量控制, 能够让系统输出量按照给定值的变化而变化, 这样就能把无功功率  $Q$  约束在 0var 上下小幅变动, 其变动范围工程上可以近似认为稳定不变。

## 5.4 电网电压不平衡或不对称降落仿真分析

分析电网电压不平衡或不对称降落对双转子风电系统运行的影响, 就是分析电网电压中存在负序电压分量时, 对双转子风电系统励磁变换器中 GSC、RSC 控制性能的影响。对此, 可以用理想对称电网电压条件下, 基于电网(定子)电压定向的 GSC、RSC 传统相量控制策略, 分别考查电网电压不平衡对双转子风电系统的 GSC、RSC 的性能影响, 并进一步分析电网电压出现严重瞬态不对称故障时对双转子风电系统的运行影响。

任何一个非对称分量都可以视为正序、负序和零序分量的合成。对称风力发电系统中不存在零序分量。电压不平衡度  $\delta$  定义为负序电压与正序电压之比, 即

$$\delta = \frac{u_-}{u_+} \quad (5.39)$$

按照有关规定, 电力系统 PCC 处的正常电压不平衡度小于 2%, 短时的不平衡度小于 4%, 单个用户的电压不平衡度小于 1.3%。同时, 有功功率、无功功率、直流电压中会产生二倍电网频率(即 100Hz)的波动信号。直流电压的二倍频波动使转子电流产生高次谐波, 不仅会使绕组产生不平衡发热, 而且可能导致转子侧控制的准确性下降。更为严重的是, 造成背靠背 PWM 变换器过电压和过电流, 不仅会使发电机产生转矩脉动, 进而使电网功率发生振荡, 而且对直流母线的电容器的安全运行构成威胁, 甚至造成整个并网系统发生故障。电磁转矩的脉动定义为电磁转矩二倍频分量与电磁转矩额定值之比。

同理, 有功功率转矩的脉动定义为有功功率二倍频分量与有功功率额定值之比, 而定子电流不平衡度定义为负序电流幅值与正序电流幅值之比。转子电流的不平衡度定义为频率为  $[-(\omega_l + \omega_r)f_1 / \omega_l]$  的谐波电流幅值与频率为  $[-(\omega_l - \omega_r)f_1 / \omega_l]$  的基波电流幅值之比。有关研究表明, 当电网电压不平衡度达到一定数值时, 电磁转矩, 平均功率 100Hz 脉动最大值, 定子、转子不平衡电流谐波值, 都随定子电压的不平衡度呈线性变化。

a 相电网电压在三相坐标系中的正序、负序分量分别为

$$\begin{cases} u_{a+} = \frac{1}{3} \left( u_a + e^{j\frac{2\pi}{3}} u_b + e^{j\frac{4\pi}{3}} u_c \right) \\ u_{a-} = \frac{1}{3} \left( u_a + e^{j\frac{4\pi}{3}} u_b + e^{j\frac{2\pi}{3}} u_c \right) \end{cases} \quad (5.40)$$

同样, b 相和 c 相电压也可以分解为正序、负序分量。在三相静止坐标系中, 向量的表示涉及的参数很多, 在研究发电机的相关控制方法时, 一般做法是把三相静止坐标系中的各个参数通过各种数学变换的方法等效地表示在两相坐标系中, 这样就可大大简化表达式中的参数个数。

在两相  $\alpha\beta$  坐标系中, 向量可表示为

$$\mathbf{X} = \mathbf{X}_\alpha + \mathrm{j}\mathbf{X}_\beta \quad (5.41)$$

在发电机系统中, 向量  $\mathbf{X}$  通常代表要研究的电量, 如发电机或 PWM 变换器的电压或电流、发电机内部产生的励磁磁链等。任意向量  $\mathbf{X}$  都可分解为正序、负序向量之和, 即

$$\mathbf{X} = \mathbf{X}_{abc}^+ + \mathrm{j}\mathbf{X}_{abc}^- = \mathbf{X}_{\alpha\beta}^+ + \mathrm{j}\mathbf{X}_{\alpha\beta}^- \quad (5.42)$$

式中,  $\mathbf{X}_{abc}^+$  与  $\mathbf{X}_{abc}^-$  分别是  $abc$  坐标系中的正序、负序分量,  $\mathbf{X}_{\alpha\beta}^+$  与  $\mathbf{X}_{\alpha\beta}^-$  分别是  $\alpha\beta$  两相坐标系中的正序、负序分量。在数学变换中, 任一向量  $\mathbf{X}$  都可以分成正向旋转、速度是同步速  $\omega_1$  的坐标系  $dq^+$  及负向旋转、速度是同步速  $\omega_1$  的坐标系  $dq^-$ 。 $\alpha\beta$ 、 $dq^+$  和  $dq^-$  三者平面中的位置关系如图 5.32 所示。图中,  $\theta_+$  与  $\theta_-$  分别是  $d^+$  轴、 $d^-$  轴与  $\alpha$  轴的夹角:

$$\begin{cases} \theta_+ = \omega_1 t + \theta_{0+} \\ \theta_- = -(\omega_1 t + \theta_{0-}) \end{cases} \quad (5.43)$$

式中,  $\theta_{0+}$  和  $\theta_{0-}$  分别是  $d^+$  轴、 $d^-$  轴与  $\alpha$  轴的初始相位角。可知向量  $\mathbf{X}$  在  $dq^+$ 、 $dq^-$  坐标系中可表示为

$$\mathbf{X} = \mathbf{X}_{dq^+} \mathrm{e}^{\mathrm{j}(\omega_1 t + \theta_{0+})} + \mathbf{X}_{dq^-} \mathrm{e}^{-\mathrm{j}(\omega_1 t + \theta_{0-})} \quad (5.44)$$

式中,  $\mathbf{X}_{dq^+}$  和  $\mathbf{X}_{dq^-}$  分别是正向、负向同步坐标系中的合成向量, 形式如下:

$$\begin{cases} \mathbf{X}_{dq^+} = \mathbf{X}_{d^+} + \mathrm{j}\mathbf{X}_{q^+} \\ \mathbf{X}_{dq^-} = \mathbf{X}_{d^-} + \mathrm{j}\mathbf{X}_{q^-} \end{cases} \quad (5.45)$$

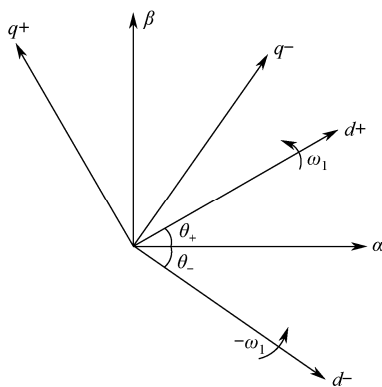


图 5.32  $\alpha\beta$ 、 $dq^+$  和  $dq^-$  坐标系关系图

本章采用  $dq_0$  坐标系建立方程,  $dq$  轴选在与气隙磁场同步旋转的坐标系上,  $d$  轴固定在永磁磁链  $\psi_f$  的方向上。

在同步旋转坐标系中, 定子侧的速度为同步速  $\omega_1$ , 转子侧的速度为  $\omega_r$ , 其与正序同步速的相对角速度之差为  $\omega_1 - \omega_r$ , 与负序同步速的相对角速度之差为  $\omega_1 + \omega_r$ , 定子侧、转子侧的量可以分别表示在  $dq^+$ 、 $dq^-$  旋转坐标系中:

$$\begin{cases} \mathbf{X}_s = \mathbf{x}_{sdq^+} \mathrm{e}^{\mathrm{j}\omega_1 t} + \mathbf{x}_{sdq^-} \mathrm{e}^{-\mathrm{j}\omega_1 t} \\ \mathbf{X}_r = \mathbf{x}_{rdq^+} \mathrm{e}^{\mathrm{j}(\omega_1 - \omega_r)t} + \mathbf{x}_{rdq^-} \mathrm{e}^{-\mathrm{j}(\omega_1 + \omega_r)t} \end{cases} \quad (5.46)$$

在同步旋转坐标系中, 双转子风力发电机的电压方程为

$$\begin{cases} u_s = R_s i_s + p\psi_s + j\omega_0 \psi_s \\ u_r = R_r i_r + p\psi_r + j(\omega_l - \omega_r) \psi_r \end{cases} \quad (5.47)$$

式中, 磁链为

$$\begin{cases} \psi_s = L_{ss} i_s - L_m i_r + \psi_f \\ \psi_r = -L_m i_s - L_{rr} i_r + \psi_f \end{cases} \quad (5.48)$$

式(5.47)和式(5.48)在  $dq+$  坐标系中的电压和磁链正序方程为

$$\begin{cases} u_{sdq+} = -R_s i_{sdq+} + p\psi_{sdq+} + j\omega_1 \psi_{sdq+} \\ u_{rdq+} = R_r i_{rdq+} + p\psi_{rdq+} + j\omega_2 \psi_{rdq+} \\ \psi_{sdq+} = L_{ss} i_{sdq+} - L_m i_{rdq+} + \psi_f \\ \psi_{rdq+} = -L_m i_{sdq+} + L_{rr} i_{rdq+} + \psi_{fdq+} \end{cases} \quad (5.49)$$

式(5.48)与式(5.49)在  $dq-$  坐标系中的双转子风力发电机电压和磁链负序表达式为

$$\begin{cases} u_{sdq-} = -R_s i_{sdq-} + p\psi_{sdq-} + j\omega_1 \psi_{sdq-} \\ u_{rdq-} = R_r i_{rdq-} + p\psi_{rdq-} + j\omega_2 \psi_{rdq-} \\ \psi_{sdq-} = L_{ss} i_{sdq-} - L_m i_{rdq-} + \psi_{fdq-} \\ \psi_{rdq-} = -L_m i_{sdq-} + L_{rr} i_{rdq-} + \psi_{fdq-} \end{cases} \quad (5.50)$$

永磁转子速度等于同步速  $\omega_1$ , 永磁磁链为  $\psi_f$ , 其旋转速度大小也是同步速, 此时不含负序分量, 即

$$\begin{cases} \psi_{fdq+} = \psi_f \\ \psi_{fdq-} = 0 \end{cases} \quad (5.51)$$

设定子正序磁链位于  $dq+$  坐标系的  $d+$  轴位置, 不计其他影响, 认为定子正序磁链  $\psi_{sdq+}$  的大小不变, 且速度恒为  $\omega_1$ , 则有

$$\begin{cases} \psi_{sd+} = \psi_{s+} \\ \psi_{sq+} = 0 \end{cases} \quad (5.52)$$

式中,  $\psi_{s+}$  为定子正序磁链。可知  $p\psi_{s+} = 0$ 。另外, 忽略发电机的定子电阻, 定子电压简化为

$$u_{sdq+} = u_{sd+} + j u_{sq+} = j\omega_1 \psi_{s+}$$

或

$$\begin{cases} u_{sd+} = 0 \\ u_{sq+} = \omega_1 \psi_{s+} = u_{s+} \end{cases} \quad (5.53)$$

式中,  $u_{s+}$  是电网电压的正序分量。转子的正序磁链为

$$\psi_{rdq+} = -\frac{L_m}{L_{ss}} \psi_{s+} + \left(1 + \frac{L_m}{L_{ss}}\right) \psi_f + \left(L_{rr} + \frac{L_m^2}{L_{ss}}\right) i_{rdq+} \quad (5.54)$$

得转子的正序电压方程为

$$u_{rdq+} = (R_r + \sigma p)i_{rdq+} + j\omega_2 \sigma i_{rdq+} + j\omega_2 \frac{(L_{ss} + L_m)\psi_f - L_m\psi_{s+}}{L_{ss}} \quad (5.55)$$

由此, 如果系统电压中有不平衡分量出现, 那么按照经典 PI 理论, 正序转子电流调节方程可用  $(R_r + \sigma p)i_{rdq+}$  来为 PI 调节变量, 把  $j\omega_2 \sigma i_{rdq+}$  选为控制转子电流修正值,  $j\omega_2 \frac{(L_{ss} + L_m)\psi_f - L_m\psi_{s+}}{L_{ss}}$  可以是定子参数的修正值。可得正序转子电流调节表达式为

$$u_{rdq+} = (k_p \Delta i_{rdq+} + k_i \int \Delta i_{rdq+} dt) + j\omega_2 \sigma i_{rdq+} + j\omega_2 \frac{(L_{ss} + L_m)\psi_f - L_m\psi_{s+}}{L_{ss}} \quad (5.56)$$

式中,  $k_p$  与  $k_i$  为正序电流调节控制器的比例积分 (PI) 系数,  $\Delta i_{rdq+}$  是相应正序电流与测量值的差值。采用比例积分 (PI) 调节可让输出的实测电流值跟随电流的设定值。

如前所述, 如果设在负序坐标系中负序磁链位于  $d$  轴, 不计过渡的瞬时变量, 负序磁链的大小恒定且方向与同步磁场相反, 那么负序转子的电压和电流关系为

$$u_{rdq-} = (R_r + \sigma p)i_{rdq-} + j\omega_2 \sigma i_{rdq-} - j\omega_2 \frac{L_m\psi_{s-}}{L_{ss}} \quad (5.57)$$

式(5.56)与式(5.57)不同的是, 负序电压中永磁磁链项为 0, 因为永磁材料产生的磁场一直按照同步转速运行, 它们之间没有相位差, 所以当电压不平衡情况出现时, 它不会影响负序电压的变化, 即不存在负序分量。因此, 此时的负序转子绕组电流中也不存在永磁磁链:

$$u_{rdq-} = (k_p \Delta i_{rdq-} + k_i \int \Delta i_{rdq-} dt) + j\omega_2 \sigma i_{rdq-} - j\omega_2 \frac{L_m\psi_{s-}}{L_{ss}} \quad (5.58)$$

式中,  $k_p$  与  $k_i$  是采用负序分量抑制调节时比例积分 (PI) 调节的变量, 而  $\Delta i_{rdq-}$  是给定负序电流与实际负序电流之差。采用比例积分 (PI) 调节可让输出的实测电流值跟随电流的设定值。

### 5.4.1 电网电压出现不平衡分量时的功率和转矩

系统电压出现不平衡分量时, 发电机的输出视在功率表达式为

$$S_s = P_s + jQ_s = \frac{3}{2} u \hat{i}_s \quad (5.59)$$

式中,  $\hat{i}_s$  是定子绕组电流  $i_s$  的共轭值,  $P_s$  是发电机输出的平均功率,  $Q_s$  是发电机输出的无功功率。定子电压和电流为

$$\begin{cases} \mathbf{u}_s = \mathbf{u}_{sdq+} e^{j\omega_1 t} + \mathbf{u}_{sdq-} e^{-j\omega_1 t} \\ \mathbf{i}_s = \mathbf{i}_{sdq+} e^{j\omega_1 t} + \mathbf{i}_{sdq-} e^{-j\omega_1 t} \end{cases} \quad (5.60)$$

定子电流以转子电流为变量时, 可改写为

$$\begin{cases} i_{sdq+} = \frac{\psi_{s+} - \psi_f}{L_{ss}} + \frac{L_m}{L_{ss}} i_{rdq+} \\ i_{sdq-} = \frac{\psi_{s-}}{L_{ss}} + \frac{L_m}{L_{ss}} i_{rdq-} \end{cases} \quad (5.61)$$

可得有功功率和无功功率为

$$\begin{cases} P_s = P_{s0} + P_{ss2} \sin 2\omega_1 t + P_{sc2} \cos 2\omega_1 t \\ Q_s = Q_{s0} + Q_{ss2} \sin 2\omega_1 t + Q_{sc2} \cos 2\omega_1 t \end{cases} \quad (5.62)$$

式中,

$$\begin{cases} P_{s0} = \frac{L_m}{L_{ss}}(u_{s+}i_{rd+} + u_{s-}i_{rd-}) - \frac{u_{s+}\psi_f}{L_{ss}} \\ P_{ss2} = \frac{L_m}{L_{ss}}(u_{s+}i_{rq-} - u_{s-}i_{rq+}) \\ P_{sc2} = \frac{L_m}{L_{ss}}(u_{s+}i_{rd-} + u_{s-}i_{rd+}) - \frac{u_{s-}\psi_f}{L_{ss}} \end{cases} \quad (5.63)$$

$$\begin{cases} Q_{s0} = \frac{L_m}{L_{ss}}(u_{s+}i_{rq+} + u_{s-}i_{rq-}) + \frac{u_{s+}^2 + u_{s-}^2}{\omega_1 L_{ss}} \\ Q_{ss2} = \frac{L_m}{L_{ss}}(u_{s+}i_{rd-} - u_{s-}i_{rd+}) + \frac{u_{s-}\psi_f}{L_{ss}} \\ Q_{sc2} = -\frac{L_m}{L_{ss}}(u_{s+}i_{rq-} + u_{s-}i_{rq+}) - \frac{2u_{s+}u_{s-}}{\omega_1 L_{ss}} \end{cases} \quad (5.64)$$

由式(5.64)可知, 电网电压出现不平衡分量时, 定子绕组产生功率的变化频率是正常频率的二倍。式中,  $P_{s0}$ 、 $Q_{s0}$  为有功功率均值和无功功率均值,  $P_{ss2}$ 、 $Q_{ss2}$  是以二倍正常频率变化的最大值,  $P_{sc2}$ 、 $Q_{sc2}$  是二倍频变量余弦最大值。输出功率的二倍频的波动可以通过对负序电流的控制来实现。

三相电压不平衡时, 电磁转矩为

$$T_e = \frac{3}{2} n_p \psi_s \times i_s \quad (5.65)$$

或

$$T_e = T_{e0} + T_{es2} \sin 2\omega_1 t + T_{ec2} \cos 2\omega_1 t \quad (5.66)$$

式中,

$$\begin{cases} T_{e0} = \frac{n_p L_m}{\omega_1 L_{ss}}(u_{s+}i_{rd+} + u_{s-}i_{rd-}) \\ T_{es2} = \frac{n_p L_m}{\omega_1 L_{ss}}(u_{s+}i_{rd-} - u_{s-}i_{rd+}) + \frac{n_p u_{s-}\psi_f}{\omega_1 L_{ss}} \\ T_{ec2} = \frac{n_p L_m}{\omega_1 L_{ss}}(u_{s+}i_{rq-} + u_{s-}i_{rq+}) + \frac{2n_p u_{s+}u_{s-}}{\omega_1^2 L_{ss}} \end{cases} \quad (5.67)$$

易知, 电磁转矩表达式中有二倍频的参数, 出现这种情况时, 三相电网的不平衡是主要因素。大小和频率的波动致使转矩造成装置的机械振动, 所以必须想办法减少上述情况的发生。

## 5.4.2 双转子风力发电机在电压不平衡时的研究

电网电压不平衡时, 会直接导致发电机定子绕组和转子绕组中的电流不对称, 造成定子、转子绕组发热不平衡, 严重时可能会使电机过热而发生热击穿损坏。不仅如此, 针对



不平衡状态下发电机功率与电磁转矩的研究说明, 它们都含有以频率 100Hz 变动的脉动, 因而会危及电力系统正常状态下的各个参量。为了维持系统的稳定与安全, 应该设法限制其波动幅值。

因此, 当系统出现不平衡故障时, 双转子风力发电系统的调节参数包含 5 项, 即定子电流、转子电流、平均输出功率、无功功率和电磁转矩。

#### (1) 减小定子电流不平衡

定子电流不平衡的原因是发电机电流中含有负序电流分量, 因此只需使负序电流为零即让  $i_{sdq-} = 0$  就可实现目的。由磁链表达式可得

$$\begin{cases} i_{rd-} = -\frac{\psi_{s-}}{L_m} \\ i_{rq-} = 0 \end{cases} \quad (5.68)$$

#### (2) 减小转子电流不平衡

转子电流不平衡的原因是发电机电流中含有负序电流分量, 因此可令

$$\begin{cases} i_{rd-} = 0 \\ i_{rq-} = 0 \end{cases} \quad (5.69)$$

#### (3) 抑制定子侧有功功率脉动

令式(4.24)中 100Hz 的正弦量的幅值是  $P_{ss2}$ , 100Hz 的余弦量的幅值是  $P_{sc2}$ , 并令它们的值为 0,

$$\begin{cases} P_{ss2} = 0 \\ P_{sc2} = 0 \end{cases} \quad (5.70)$$

可知, 转子电流的正序、负序分量为

$$\begin{cases} i_{rd-} = \frac{u_{s-}\psi_f}{u_{s+}L_m} - \frac{u_{s-}i_{rd+}}{u_{s+}} \\ i_{rq-} = \frac{u_{s-}}{u_{s+}}i_{rq+} \end{cases} \quad (5.71)$$

#### (4) 减小定子侧无功功率的小幅变化

$$\begin{cases} Q_{ss2} = 0 \\ Q_{sc2} = 0 \end{cases} \quad (5.72)$$

有

$$\begin{cases} i_{rd-} = \frac{u_{s-}\psi_f}{u_{s+}L_m} + \frac{u_{s-}i_{rd+}}{u_{s+}} \\ i_{rq-} = -\frac{2u_{s-}}{\omega_1 L_m} - \frac{u_{s-}}{u_{s+}}i_{rq+} \end{cases} \quad (5.73)$$

#### (5) 限制电磁转矩脉动的措施

$$\begin{cases} T_{ss2} = 0 \\ T_{sc2} = 0 \end{cases} \quad (5.74)$$

有

$$\begin{cases} i_{rd-} = \frac{u_{s-}\psi_f}{u_{s+}L_m} + \frac{u_{s-}i_{rd+}}{u_{s+}} \\ i_{rq-} = -\frac{2u_{s-}}{\omega_l L_m} - \frac{u_{s-}}{u_{s+}} i_{rq+} \end{cases} \quad (5.75)$$

基于以上研究,电磁转矩波动和无功功率变化的调节模型大致一样。因此,为了减小电磁转矩的大幅变化,我们可以减小无功功率,并且两者的调解效果趋于一致。

综上所述,在三相交流电网因发生故障而导致三相不平衡时,可选定 4 个控制参数进行调节,调节参数与控制方式见表 5.2。

表 5.2 电压不平衡时双转子风力发电系统的调节参数与控制方式

调节参数	控制方式	
	$i_{rd-}$	$i_{rq-}$
定子电流	$\frac{\psi_{s-}}{L_m}$	0
转子电流	0	0
平均功率	$\frac{u_{s-}\psi_f}{u_{s+}L_m} - \frac{u_{s-}i_{rd+}}{u_{s+}}$	$\frac{u_{s-}}{u_{s+}} i_{rq+}$
电磁转矩	$\frac{u_{s-}\psi_f}{u_{s+}L_m} + \frac{u_{s-}i_{rd+}}{u_{s+}}$	$-\frac{2u_{s-}}{\omega_l L_m} - \frac{u_{s-}}{u_{s+}} i_{rq+}$

如表所示,4 个调节参数的最优控制效果不会同时出现,应该按照电力系统控制的要求有针对性地选择调节参数。

### 5.4.3 双转子风力发电系统在电网电压不平衡时的控制仿真研究

根据式(4.18),得到转子  $d+$  轴电流与  $q+$  轴电流的表达式为

$$\begin{cases} u_{rd+} = (k_p \Delta i_{rd+} + k_i \int \Delta i_{rd+} dt) - \omega_2 \sigma i_{rq+} \\ u_{rq+} = (k_p \Delta i_{rq+} + k_i \int \Delta i_{rq+} dt) + \omega_2 \sigma i_{rd+} + \omega_2 \frac{(L_{ss} + L_m)\psi_f - L_m \psi_{s+}}{L_{ss}} \end{cases} \quad (5.76)$$

可得定子  $d$ -轴电流和  $q$ -轴电流的表达式为

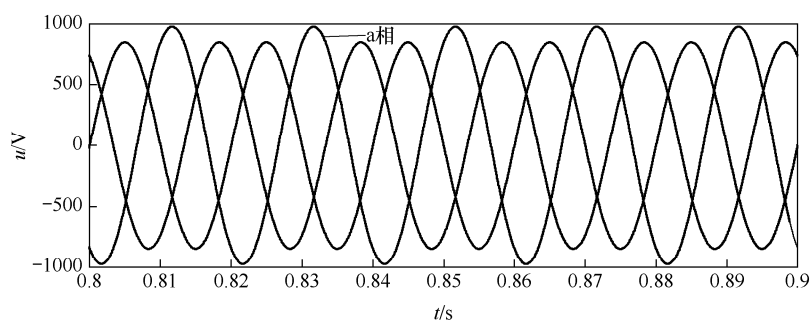
$$\begin{cases} u_{rd-} = (k_p \Delta i_{rd-} + k_i \int \Delta i_{rd-} dt) - \omega_2 \sigma i_{rq-} \\ u_{rq-} = (k_p \Delta i_{rq-} + k_i \int \Delta i_{rq-} dt) + \omega_2 \sigma i_{rd-} - \omega_2 \frac{L_m \psi_{s-}}{L_{ss}} \end{cases} \quad (5.77)$$

转子负序电流产生的原因是电网电压不平衡,此时要按照上述 4 种调节方式来决定转子负序电流的控制结果。

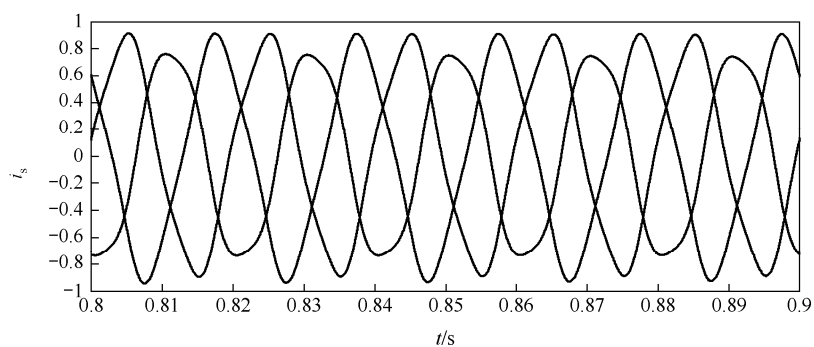
系统电压不平衡时,发电系统并网控制原理如图 5.33 所示。

由图可知,正序和负序坐标中物理量的值,是通过转子变量的坐标变换和正序或负序分解来获得的。转子负序电流设定值通过运算计算模块,按照转子负序电流的不同控制效果来测定。 $\Delta u_{xx}$  是转子侧电压的反馈量,其作用是为转子电流和定子磁链提供一定的支持,以便减小对转子电压的扰动。反馈量可用如下方程表示:

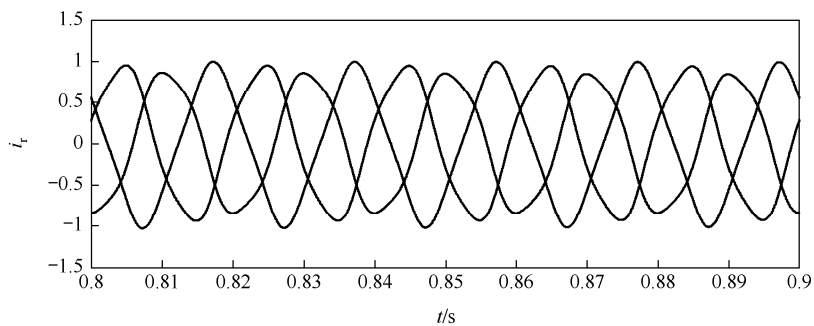
$$\left\{ \begin{aligned} \Delta u_{\text{rd}+} &= -\omega_2 \sigma i_{\text{rq}+} \\ \Delta u_{\text{rq}+} &= +\omega_2 \sigma i_{\text{rd}+} + \omega_2 \frac{(L_{\text{m}} + L_{\text{ss}}) \psi_{\text{f}} - L_{\text{m}} \psi_{\text{s}+}}{L_{\text{ss}}} \\ \Delta u_{\text{rd}-} &= -\omega_2 \sigma i_{\text{rq}-} \\ \Delta u_{\text{rq}-} &= +\omega_2 \sigma i_{\text{rd}-} - \omega_2 \frac{L_{\text{m}} \psi_{\text{s}-}}{L_{\text{ss}}} \end{aligned} \right. \quad (5.78)$$



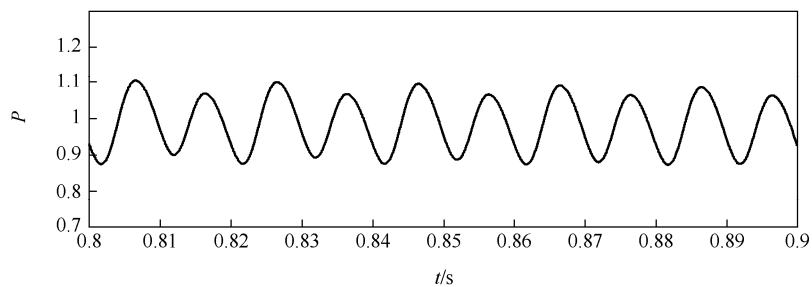
(a) 系统电压 $u$ 曲线



(b) 定子绕组电流 $i_s$ 曲线



(c) 转子绕组电流 $i_r$ 曲线



(d) 平均功率 $P$ 变动曲线

图 5.34 系统电压不平衡时一般相量控制方法的各参数曲线

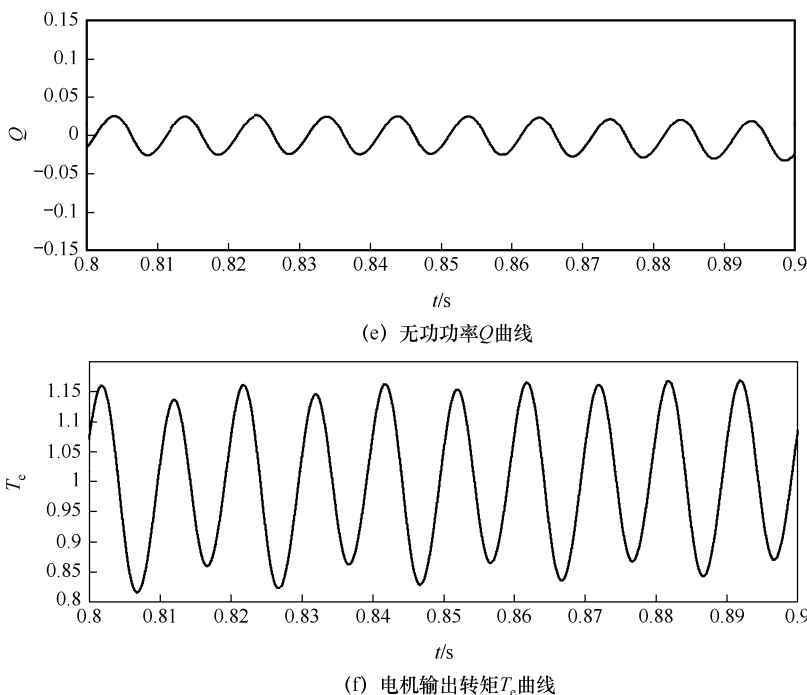


图 5.34 系统电压不平衡时一般相量控制方法的各参数曲线（续）

下面用前面提出的控制方案来处理电网的不平衡电压。如图 5.35 所示，我们目的是将转子电流在  $t = 0.2 \sim 0.4\text{s}$  期间调节到效果最佳，将定子电流在  $t = 0.4 \sim 0.6\text{s}$  期间调节到效果最佳，将平均功率在  $t = 0.6 \sim 0.8\text{s}$  期间调节到效果最佳，将无功功率在  $t = 0.8 \sim 1.0\text{s}$  期间抑制得效果最佳。此时系统的电压不平衡度是 5%。

图 5.35(a)所示为电压  $u$  的变化曲线，电网电压低，根据不平衡电网电压的分析研究，当电压不平衡度为 5% 时，在  $t = 0.2 \sim 0.4\text{s}$  期间，如图 5.35(c)所示，转子的三相电流是对称的。当  $t = 0.4 \sim 0.6\text{s}$  时，定子三相电流对称，如图 5.35(d)所示。当  $t = 0.6 \sim 0.8\text{s}$  时，如图 5.35(d)所示，有功功率的二倍频脉动显著减小，能够在标么值 1pu 上下波动，可近似认为不变。 $t = 0.6 \sim 0.8\text{s}$  时，如图 5.35(e)所示，无功功率的二倍频脉动同样减小明显，能在标么值 0pu 上下小幅波动，可近似认为不变。同时，如图 5.35(f)所示，其二倍频脉动显著降低。上述仿真研究大体表明了控制的有效性。

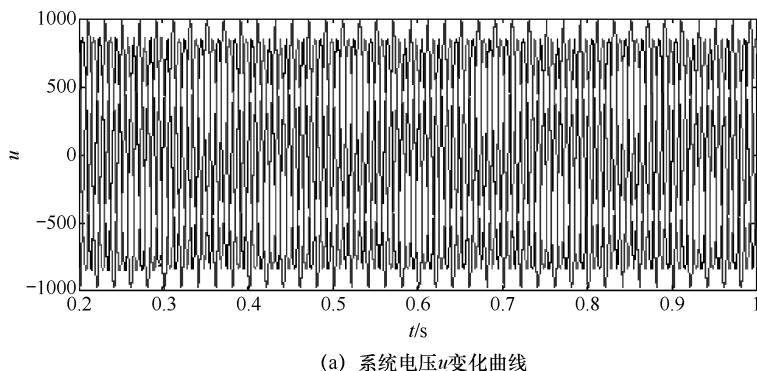
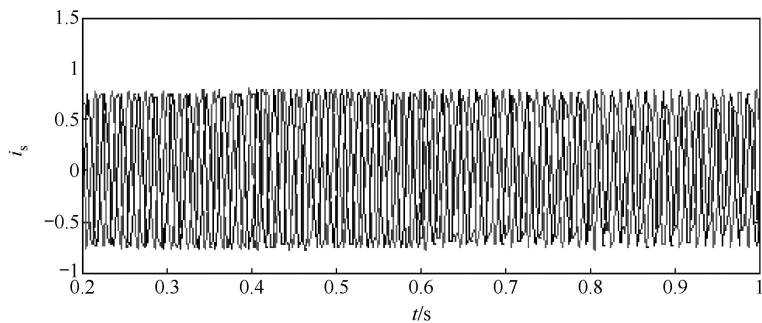
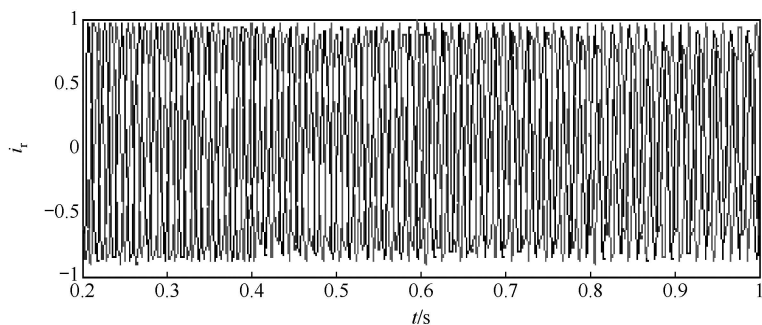


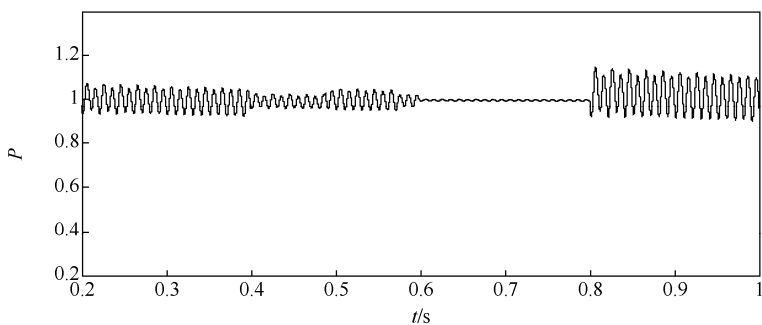
图 5.35 系统电压不平衡期间调节变量的变化曲线



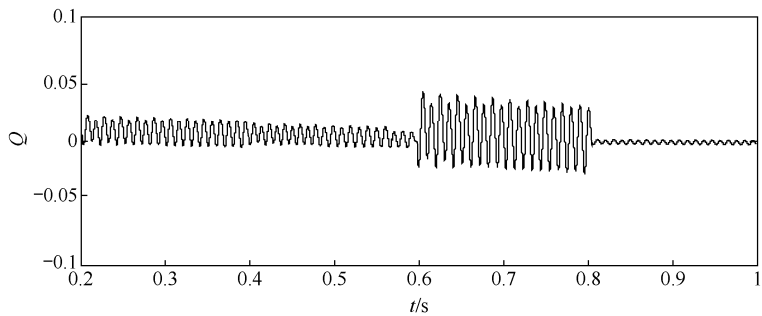
(b) 定子绕组电流 $i_s$ 变化曲线



(c) 转子绕组电流 $i_r$ 变化曲线



(d) 发电机输出平均功率 $P$ 变化曲线



(e) 发电机无功功率 $Q$ 变化曲线

图 5.35 系统电压不平衡期间调节变量的变化曲线 (续)

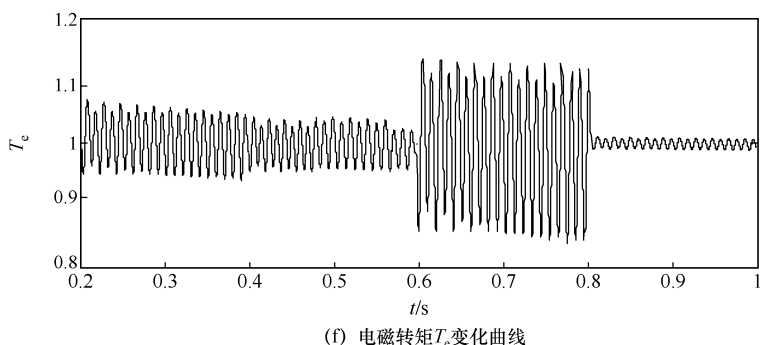


图 5.35 系统电压不平衡期间调节变量的变化曲线 (续)

针对电网电压不平衡采取控制措施时,我们关心的基本控制目标主要有 4 个,即最佳、好、较好、最差。将无功功率  $Q$  作为调节参数时,其他三个参数不会达到满意的效果。将平均功率  $P$  作为调节参数时,无功功率  $Q$  的调节效果很差,定子电流  $i_s$  和转子电流  $i_r$  两个参数的输出结果分别为好和较好。将转子电流  $i_r$  作为调节参数时,能够达到减小转子电流  $i_r$  的目的,同时能够减小定子电流  $i_s$  和平均功率  $P$  的波动,但此时无功功率  $Q$  的控制效果变差。可以看出,将定子电流  $i_s$  作为唯一关键的调节参数时,相应时刻的转子电流  $i_r$  能得到有效调节,但此时的平均功率  $P$  和无功功率  $Q$  的调节效果相对较差。因此,最优的控制方式应是在不同的时间节点采用不同的变量作为调节参数。

表 5.3 对比了各种控制目标下各调节参数的调节效果。

表 5.3 各调节参数的调节效果

调节参数	调节效果			
	转子电流 $i_r$ ( $t = 0.2 \sim 0.4s$ )	定子电流 $i_s$ ( $t = 0.4 \sim 0.6s$ )	平均功率 $P$ ( $t = 0.6 \sim 0.8s$ )	无功功率 $Q$ ( $t = 0.8 \sim 1.0s$ )
定子绕组电流 $i_s$	好	最佳	较好	最差
转子绕组电流 $i_r$	最佳	好	较好	最差
平均功率 $P$	较好	好	最佳	最差
无功功率 $Q$	较好	好	最差	最佳

上述分析说明,在不同时刻将不同参数作为控制目标,效果将达到相对最佳。

## 5.5 电网严重故障低电压穿越运行仿真

当前常见的风电机组低压穿越保护控制,通常利用转子侧快速短接撬棒电路来实现。图 5.36 所示为两种典型的撬棒装置电路结构。

各种撬棒电路的基本运行原理是电网发生电压降落,故障使转子侧 PWM 变换器电流显著增大,撬棒电路中电力电子开关器件接通,使电阻接入进行限流,利用旁路来减小转子侧故障电流,从而保护转子侧 PWM 变换器不会因过流而损坏。

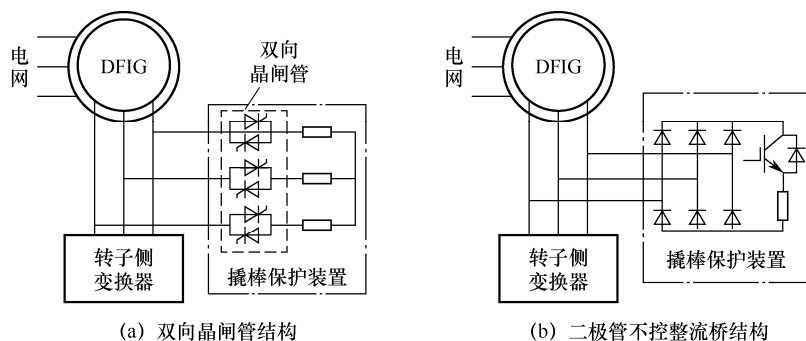
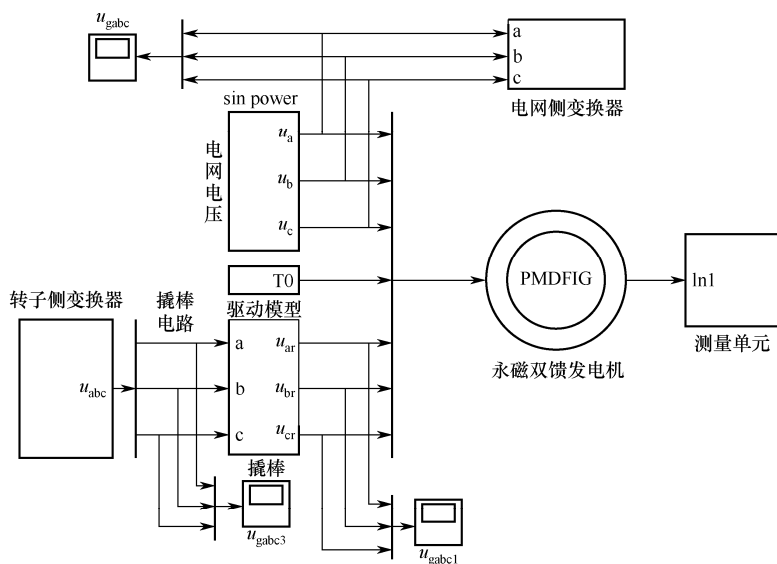


图 5.36 常见风力发电系统转子撬棒电路结构

### 5.5.1 基于撬棒保护装置的低电压穿越的仿真分析

由于 RSC 的容量有限，因此在电网电压大幅度降落故障时必须保证风力发电机组能够实现低电压穿越。保护装置的首要任务是，保证转子侧变流器安全不过流，并尽量协助电网故障快速地恢复正常。撬棒电路保护装置是比较常见的保护方式。研究表明，撬棒电路参数的选取对其调节作用影响较大，其中的关键变量是撬棒电阻值和电网电压降低的多少等。此外，撬棒电阻投入运行时间的长短，也可以改变调节作用。

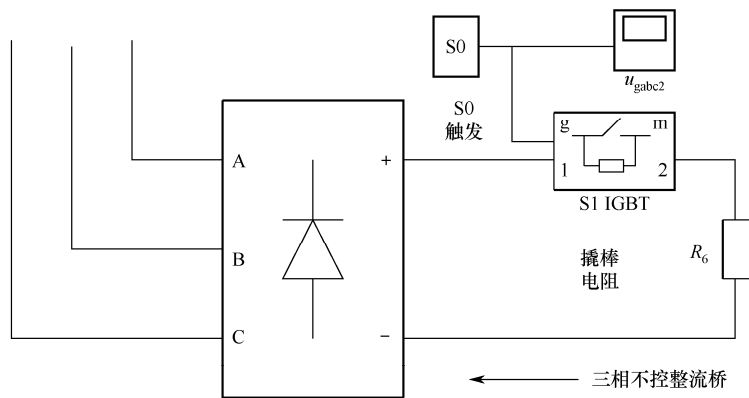
熟知撬棒电路的基本原理和参数的选取后，就可在 MATLAB/Simulink 环境下搭建电网电压降落故障时基于撬棒装置保护的系统控制仿真模型。正常运行时，并网运行转子侧 PWM 变换器采用考虑定子反馈电流的相量控制，因为故障会导致系统电压下落，此时系统可以投入撬棒电路装置，迅速退出转子侧 PWM 变换器。系统仿真控制如图 5.37 所示，其中图 5.37(a)为撬棒控制仿真模型，图 5.37(b)为撬棒主电路装置。仿真撬棒主电路装置采用三相不控整流，采用 IGBT 通断控制器件时，不同时刻可以按照控制逻辑切换撬棒电路，使其能够自动投入或及时退出。



(a) 撬棒装置调节示意图

图 5.37 撬棒装置 Simulink 仿真模型





(b) 撬棒控制主电路

图 5.37 撬棒装置 Simulink 仿真模型 (续)

双转子风力发电机模型的技术参数如下：额定功率  $P_n = 2.0\text{MW}$ ，发电机额定电压  $U_n = 690\text{V}$ ，额定频率  $f_n = 50\text{Hz}$ ，极对数  $p = 3$ ，定转子匝数比为 0.38，转子电阻标幺值为 0.008pu，定子漏感标幺值为 0.168pu，转子漏感标幺值为 0.161pu，磁性材料磁链标幺值为 0.5pu，撬棒电路装置的旁路电阻标幺值为 0.8pu，定子电阻标幺值为 0.02pu，转子互感标幺值为 2.85pu。

研究表明，随着撬棒电路电阻的增大，电压降落故障后的电流峰值会逐渐减小。分别取不同阻值的撬棒电路电阻，对降落故障的影响进行仿真研究。设在  $t = 0.4\text{s}$  时刻，风力发电机组并网变压器一次侧 25kV 电力系统发生交流三相故障，发电机端端口电压降落为 85% 额定电压，在 0.45s 时刻，系统故障清除，撬棒电路保护装置被切除。网侧和转子侧变换器采用功率模块作为开关模拟器件，其电压和电流值足够抵御过电压和过电流的峰值。当撬棒装置投入运行后，直流母线电压大于 1520V 时，撬棒电路投入，低于 1230V 时能够自动退出运行。根据相关研究，电网电压的严重降落时的性能，通常与故障期间发电机的转速和输出功率密切相关。最不利情况出现在故障发生前发电机转速和定子有功功率输出达到最大值的时刻。由此，仿真参数设定为风力机组转速标幺值 1.2pu，定子输出有功功率标幺值 1.0pu，输入风力机功率标幺值与输出保持一致，也为 1.0pu。RSC 和 GSC 的无功功率参考值设为 0。

仿真中，撬棒电路电阻分别取 0pu、0.4pu、0.8pu 和 1.2pu，所有波动曲线如图 5.38 所示。

可以看出，交流电网发生严重故障时，由于电压的大幅波动，转子立即出现很大的过电流，随着撬棒装置在  $t = 0.4\text{s}$  时刻自动投入运行，将发电机转子短路，同时将 RSC 封住，避免了 RSC 由于过电流而烧毁。其实，以上动作期间，发电机相当于鼠笼式异步发电机并网运行，这时发电机吸收网络中多余的无功功率，这将导致电网电压进一步降低。因此，电网故障清除前，撬棒电路必须清除，否则会导致发电机继续吸收电网中的无功，最终不利于电网电压的恢复，严重时可能会导致系统解列。

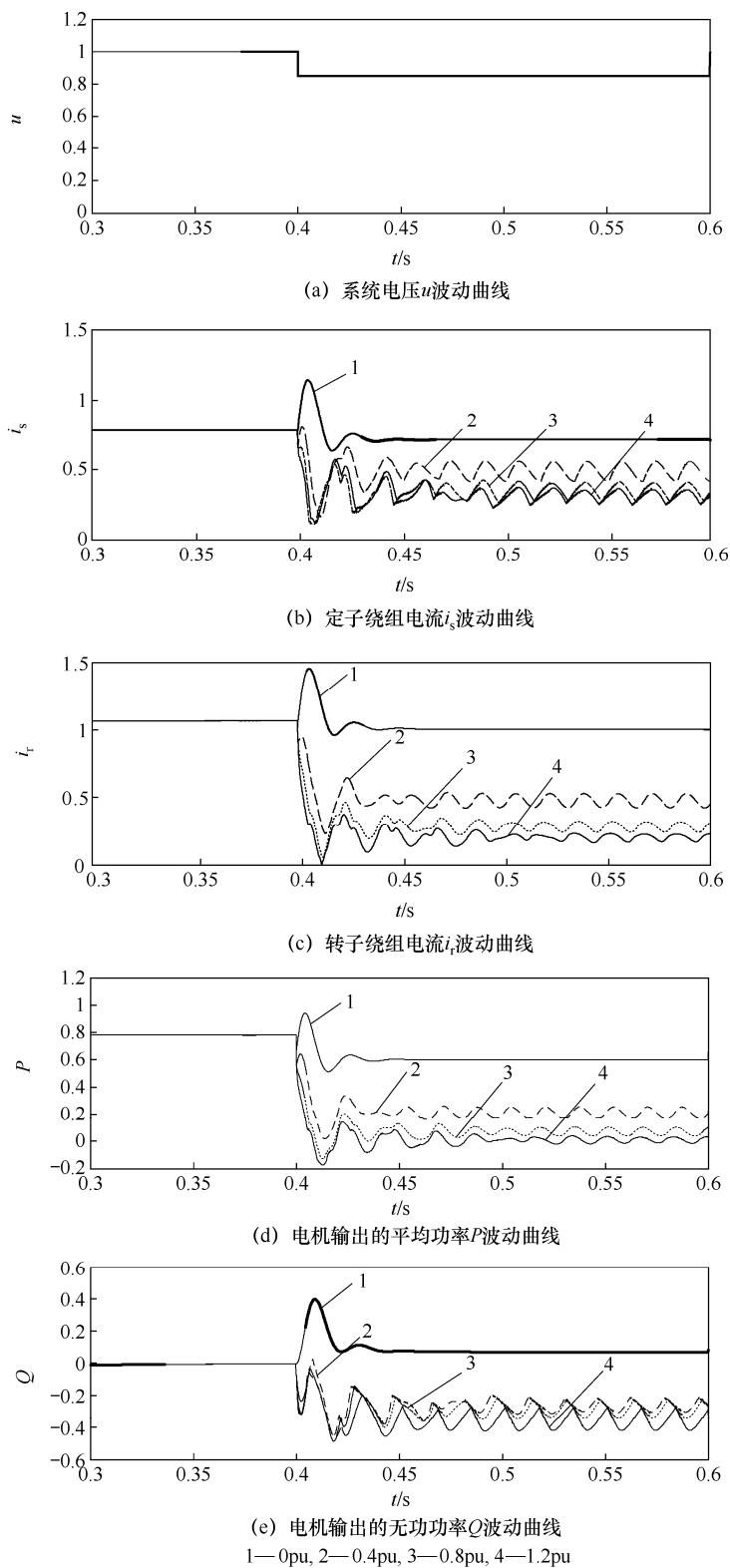


图 5.38 设定不同电阻值时风电机组的输出波动曲线

图 5.38 中的曲线 1 表示撬棒电阻标幺值为 0pu 时的参数变化情况, 曲线 2 表示撬棒电路电阻标幺值为 0.4pu 时的参数变化情况, 曲线 3 表示撬棒电路电阻标幺值为 0.8pu 时的参数波动情况, 曲线 4 表示撬棒电路电阻标幺值为 1.2pu 时的参数波动情况。由图 5.38(a)可知, 在  $t = 0.4\text{s}$  时刻, 电压减小, 并减小到额定电压值的 0.85 倍。如图 5.38(b)所示, 系统电压在故障期间降低, 如果撬棒电阻为 0, 那么风力发电机的定子电流骤然增大, 一旦撬棒电阻投入, 就能够很好地抑制定子电流的大幅变动。而且, 随着撬棒电路电阻值的增加, 定子电流波动明显减小。如图 5.38(c)~(e)所示, 随着撬棒电路电阻值的增加, 发电机转子电流、有功功率和无功功率的振荡降低。此时, 应该能够使平均功率变动减小, 多余的能量可以变为热量消耗在撬棒电阻上。故障期间, 由于串联电阻的接入, 使得故障期间的功率被快速耗散, 同时提高了发电机运行时的功率因数, 因此对交流电网电压的恢复是有利的, 但当电阻值继续增大时, 功率因数提高并不明显, 反而导致电网电压恢复时刻的电磁转矩被动加大; 此外, 电阻值的选取需要能够抑制转子侧过大的电压变化, 并要满足在故障持续时间内, 撬棒装置电阻的发热在允许范围内。

由此, 撬棒装置电阻值的选取不能过大也不能过小, 因为当撬棒电阻增大到某一数值时, 会导致撬棒电阻上的电压升高, 达到发电机转子的极限绝缘水平而烧毁发电机。此外, 故障期间发电机的定子、转子电流应在合理的区间内波动, 否则不利于发电机的安全、稳定运行。

仿真结果表明, 系统电压降低程度不同时, 撬棒电阻可以很好地限制转子过电流。以下建立具体的仿真模型, 分析电压出现不同程度的降落时, 投入撬棒电路对系统各参数的影响。设撬棒电路的电阻标幺值是 0.8pu, 电压标幺值依次降低到额定电压值的 0.45、0.65 和 0.85 倍。分析出现这些故障时撬棒电路电阻值的大小对并网参数的抑制和调节作用。

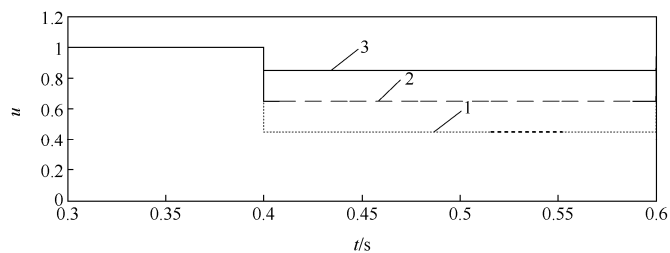
由图 5.39 可知, 波形 1 是 45% 的额定电压, 波形 2 是 65% 的额定电压, 波形 3 是 85% 的额定电压。图 5.39(a)所示是电网电压, 由图可知, 当  $t = 0.4\text{s}$  时, 三相交流电网电压开始降落, 如图 5.39(b)所示。随着电压不断降低, 定子侧电流的最大值和正常运行时不同, 可知当电压降落幅度发生改变时, 撬棒电路能够对定子电流、转子电流及有功功率、无功功率的波动起到不同程度的抑制效果。然而, 随着电压降落的幅度变大, 系统运行状态变差, 即使此时撬棒电路投入, 定子、转子的故障电流也可能超过允许值, 但如果撬棒电路中的散热电阻选择合适, 就能很好地抑制故障电流。由图 5.39 可以看出, 撬棒电路在系统故障期间的投入对电网的低电压运行有较积极的效果。

电压骤降的幅度不断加大时, 即故障愈加严重时, 虽然投入了撬棒装置, 但发电机的定子、转子电流也会不断变大, 而在撬棒电路的作用下电流迅速衰减。电流最大值随着下降的程度而增加。如图 5.39 所示, 当电网电压下降时, 特别是在深度下降故障时, 必须投入撬棒电路。

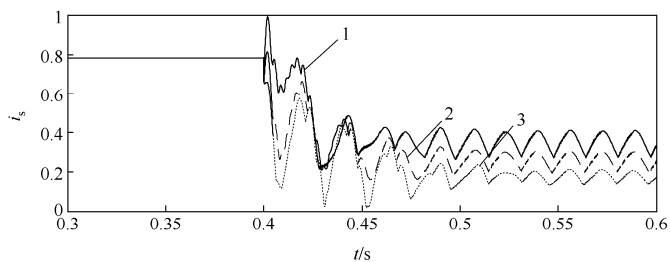
由此得出如下结论:

(1) 在三相交流电网电压大幅降低的情况下, 撬棒装置的投入可以限制故障期间发电机电流的大幅波动, 相应的功率上下变动降低, 风电输出维持不变, 不会对机构部件产生振动。

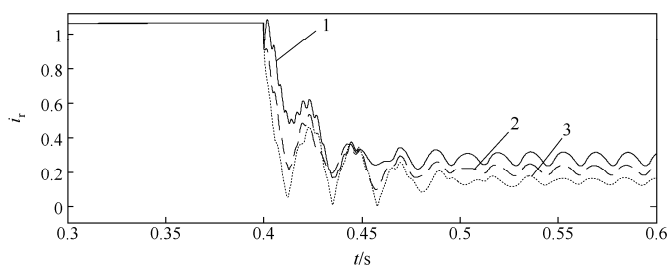
(2) 如果由于一些故障原因使得系统电压幅值骤降, 此时电流增加, 那么系统运行能力会变得较差。



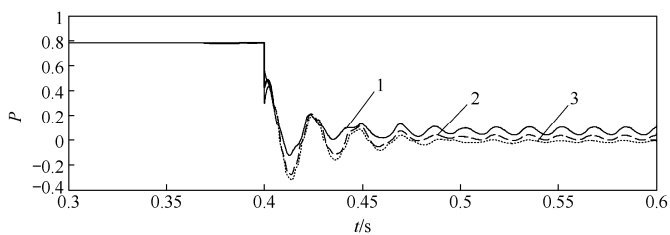
(a) 系统电压 $u$ 波动曲线



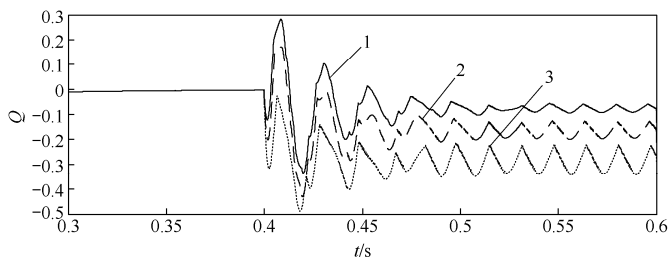
(b) 发电机定子电流 $i_s$ 波动曲线



(c) 发电机转子电流 $i_r$ 波动曲线



(d) 发电机输出平均功率 $P$ 波动曲线



(e) 发电机输出无功功率 $Q$ 波动曲线

1—45%, 2—65%, 3—85%

图 5.39 电压降落对系统变量的影响

以上研究说明,撬棒电路在系统故障期间投入,对电网恢复稳定有一定的积极作用。撬棒电路的投入运行对电力系统参数的影响,其控制效果在仿真波形中显而易见。通常情况下,电压降落和故障前的各参数无法提前预见,因此在前期研究中,按照故障最为严重的条件来选取撬棒电路的主要参数。撬棒电路电阻值的选取必须在系统具体情况的基础上,于设计阶段综合决定。

根据相关研究,设计阶段可以确定撬棒电路电阻参数的具体数值。在实际使用过程中,必须依据使用情况进行调整,以便保证限制电压降落故障期间 RSC 电流的过大波动,特别是有功功率的波动。撬棒电路可以保证直流电压稳定。只有保证了母线电压的稳定,才能做到有效地减小故障期间电流和有功功率的波动幅值。

### 5.5.2 电网三相对称短路故障时低电压穿越运行仿真

设 GSC 和 RSC 都采用考虑反馈电流的相量控制方式,且转子侧 PWM 变换器故障期间投入撬棒电路控制,以此来证明双转子风力发电机的并网时期低电压穿越的动态过渡性能。

如图 5.40(a)所示,交流电网正常运行时,设发电机的转速标么值为 1.2pu,当  $t = 1\text{s}$  时,电网的电压标么值由 1.0pu 突变为三相对称短路状态;当  $t = 1.13\text{s}$  时,故障清除,交流电网的电压恢复为标么值 1.0pu。

图 5.40(b)是直流母线电容电压  $U_{dc}$  的变化曲线,当 GSC 采用加入发电机转子反馈电流的相量控制时,直流母线电压的波动得到减弱。一般来说,撬棒装置投入运行时,母线电压的标么值  $U_{dc}$  将达到 1.26pu。

由图 5.40(c)和(d)可知,投入撬棒装置后,平均功率  $P$  和无功功率  $Q$  上下变动,但是二者能够维持在预先设定的值的附近,其变动范围工程上可以近似认为稳定不变。

由图 5.40(e)可知,在电网三相电压突然降落时,转子的转速标么值能够达到 1.218pu。

由图 5.40(f)和(g)可知,采用的控制措施能降低电压降落故障时定子电流的大小,进而减小定子电流波动对电网的冲击峰值。

由图 5.40(h)和(i)可知,撬棒控制电路可以限制电压骤降时的转子电流峰值,其电流冲击较小,能有效防止故障时 RSC 的过电流。

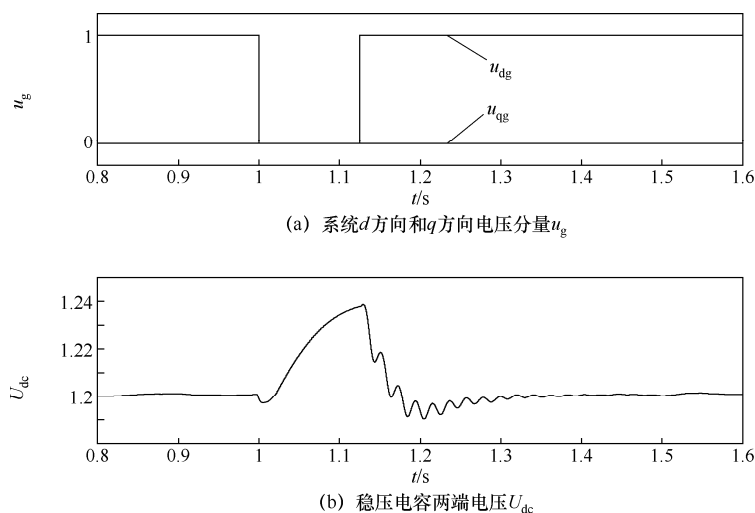
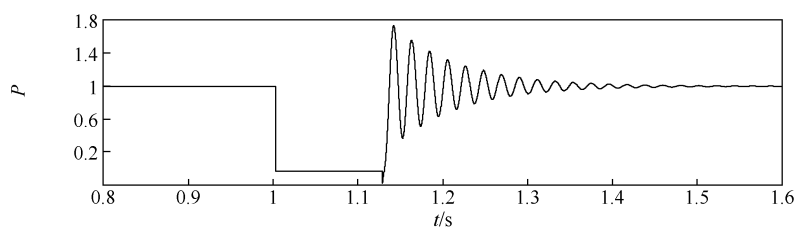
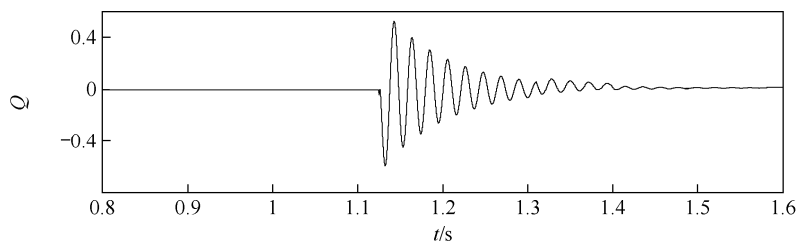


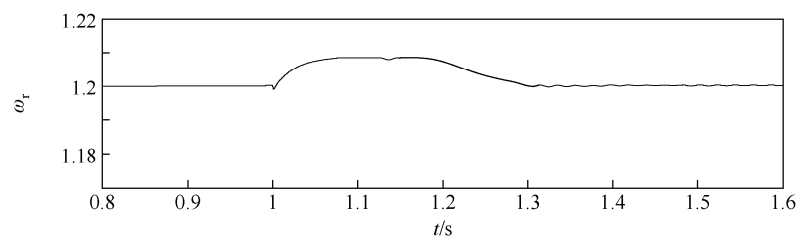
图 5.40 电网三相短路时投入撬棒电路仿真



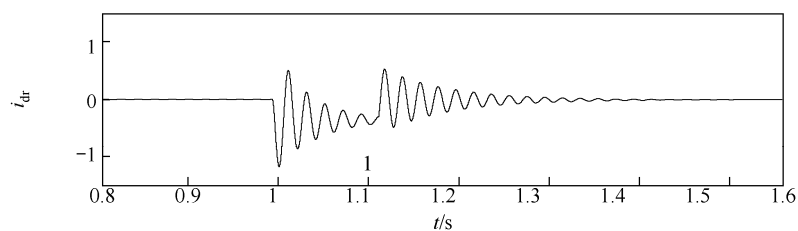
(c) 发电机输出平均功率 $P$



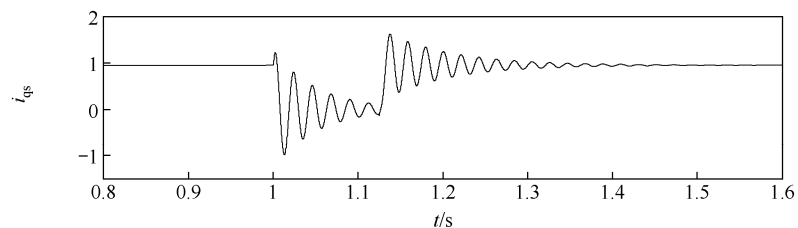
(d) 发电机输出无功功率 $Q$



(e) 转子旋转角速度 $\omega_r$



(f) 定子绕组电流 $d$ 方向分量 $i_{dr}$



(g) 定子绕组电流 $q$ 方向分量 $i_{qs}$

图 5.40 电网三相短路时投入撬棒电路仿真(续)

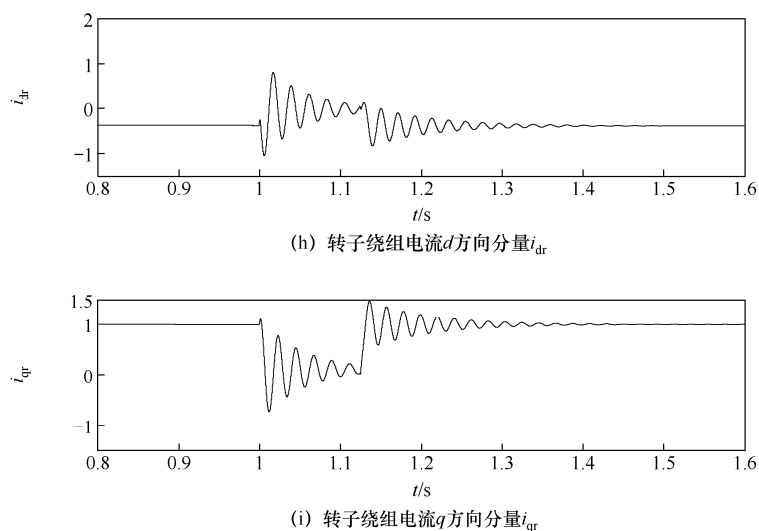


图 5.40 电网三相短路时投入撬棒电路仿真 (续)

图 5.41(b)是直流母线电容电压  $U_{dc}$  的变化曲线, GSC 采取反馈转子电流的相量控制, 直流母线电压的波动得到减弱。施加转矩控制时, 母线电压标么值  $U_{dc}$  将达到 1.23pu。

由图 5.41(c)和(d)可知, 施加转矩控制后, 有功功率  $P$  与无功功率  $Q$  能在给定值上下基本稳定, 其变动范围工程上可以近似认为稳定不变。

由图 5.41(e)可知, 在电网电压突然三相降落而施加转矩控制后, 转子转速标么值能够达到 1.20pu。

由图 5.41(f)和(g)可知, 施加转矩控制后, 控制措施能降低电压故障定子电流的大小, 并能减小定子电流波动对电网的峰值冲击。

由图 5.41(h)和(i)可知, 施加转矩控制后, 能够限制三相交流电网电压突然降落时, 转子侧绕组电流的最大值, 其电流冲击较小, 因此可以避免由于 RSC 过电流而发生损坏。

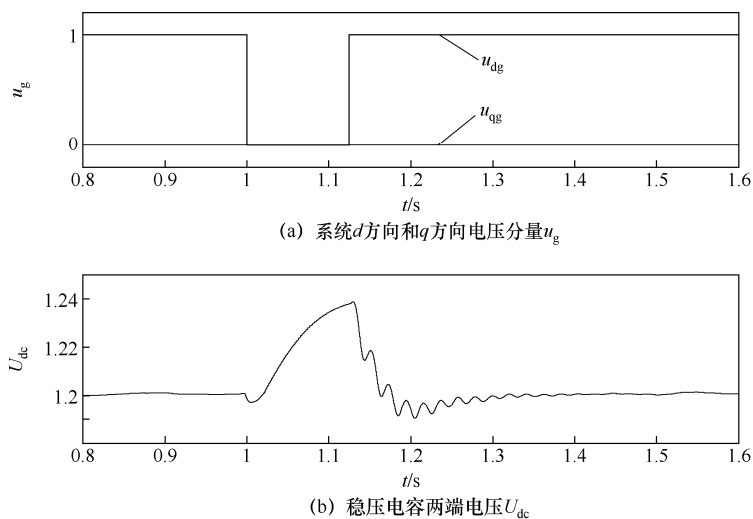
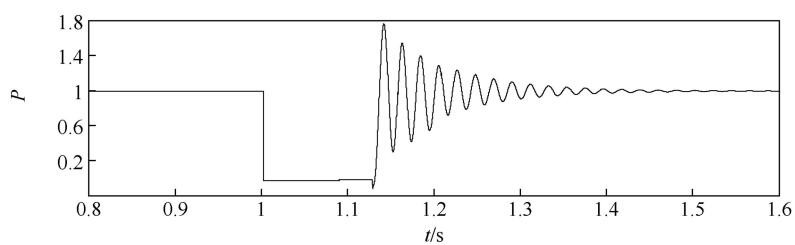
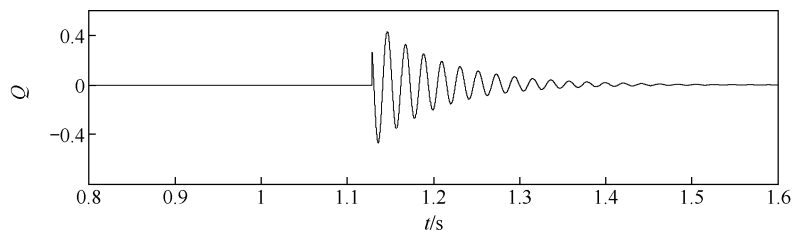


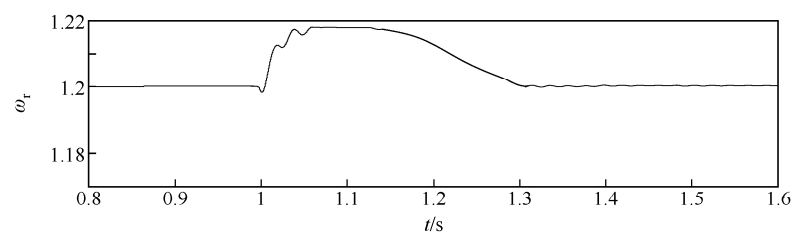
图 5.41 电网三相短路时施加转矩控制方式仿真



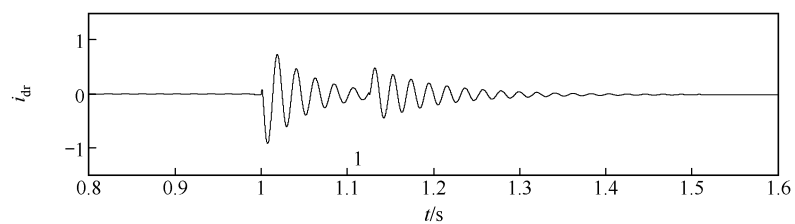
(c) 发电机输出平均功率 $P$



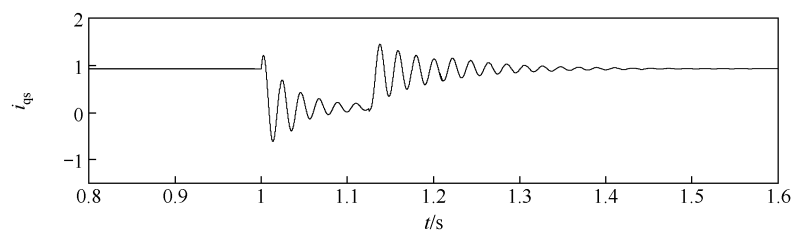
(d) 发电机输出无功功率 $Q$



(e) 转子旋转角速度 $\omega_r$



(f) 定子绕组电流 $d$ 方向分量 $i_{dr}$



(g) 定子绕组电流 $q$ 方向分量 $i_{qs}$

图 5.41 电网三相短路时施加转矩控制方式仿真(续)



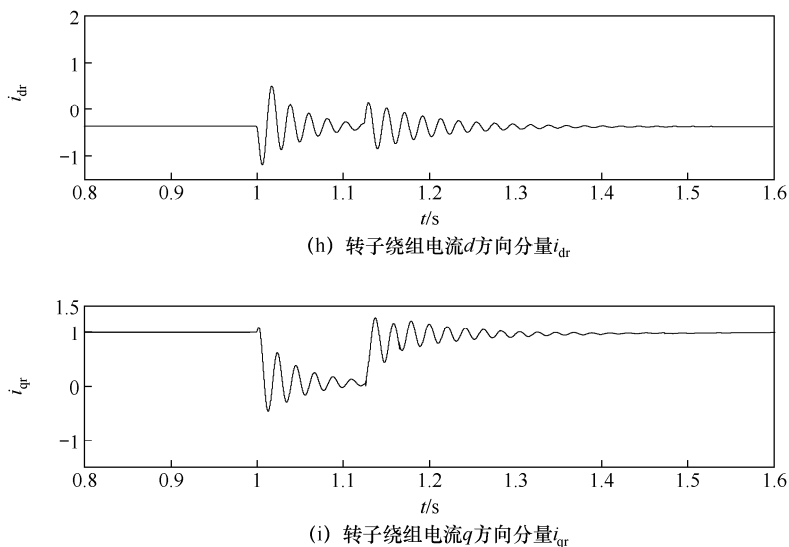


图 5.41 电网三相短路时施加转矩控制方式仿真（续）

### 5.5.3 电压降落较长时间时低电压穿越研究

如图 5.42 所示，风力发电机正常状态下的旋转速度标么值是  $1.2\text{pu}$ ， $t = 1\text{s}$  时，电压标么值由  $1.0\text{pu}$  降为  $0.14\text{pu}$ ， $t = 1.63\text{s}$  时，三相交流电网故障清除，电压恢复正常值  $1.0\text{pu}$ 。

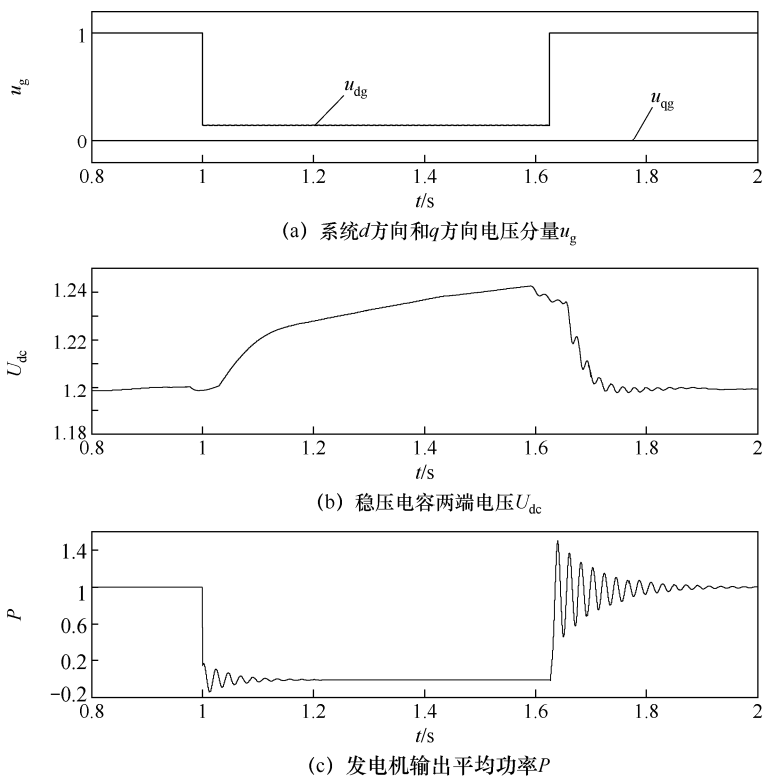
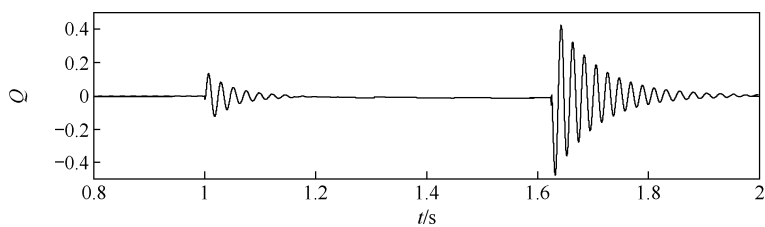
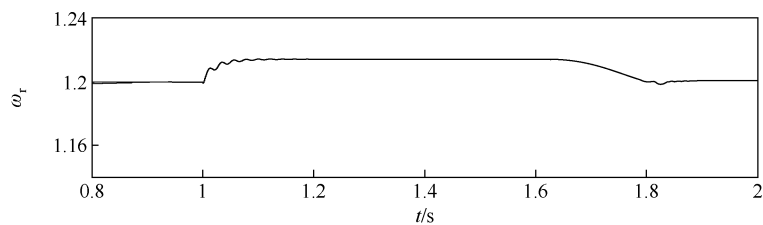


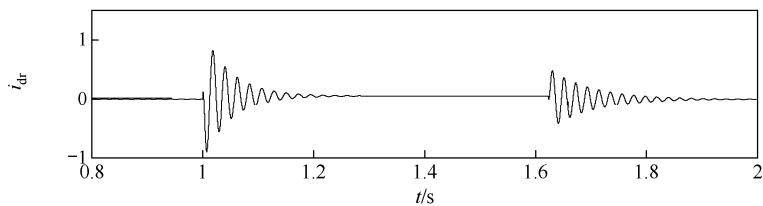
图 5.42 电网三相短路时撬棒电路控制方式仿真



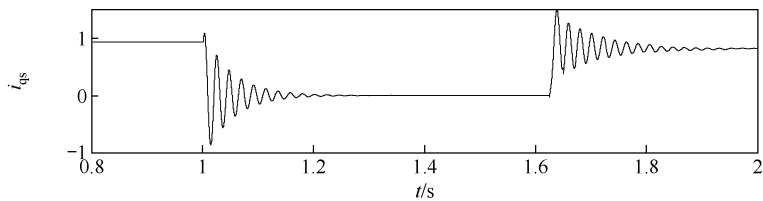
(d) 发电机输出无功功率 $Q$



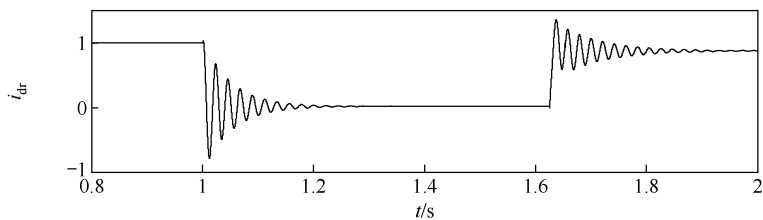
(e) 转子旋转角速度 $\omega_r$



(f) 定子绕组电流 $d$ 方向分量 $i_{dr}$



(g) 定子绕组电流 $q$ 方向分量 $i_{qs}$



(h) 转子绕组电流 $d$ 方向分量 $i_{dr}$

图 5.42 电网三相短路时撬棒电路控制方式仿真(续)

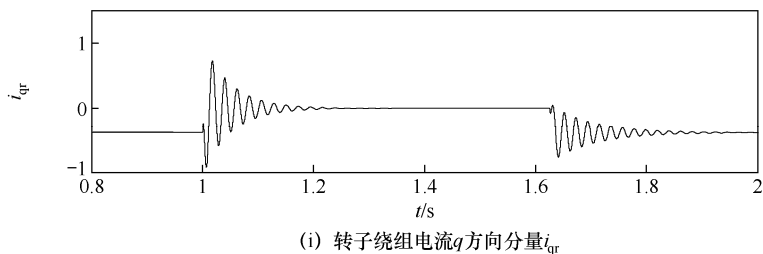


图 5.42 电网三相短路时撬棒电路控制方式仿真（续）

由图 5.43 可知，如果采用转矩调节方式，那么可以获得更好的调节效果。如图 5.43(e) 所示，发电机转子的旋转角速度可以达到 1.2pu 左右。采用变桨距控制或采取加大桨叶角措施，可以减小桨叶获得的风能，从而减缓转速的上升。

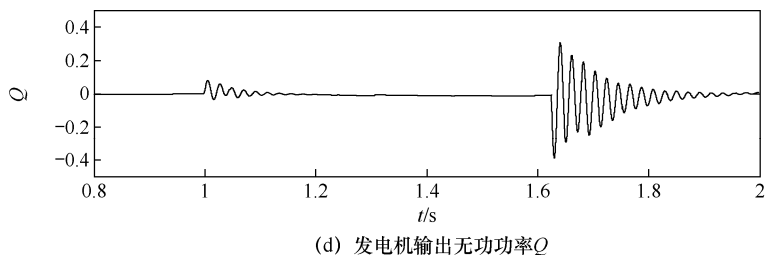
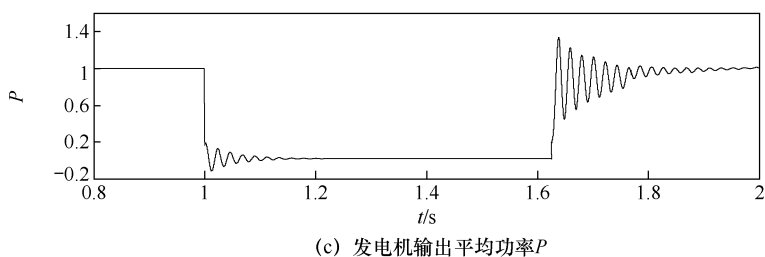
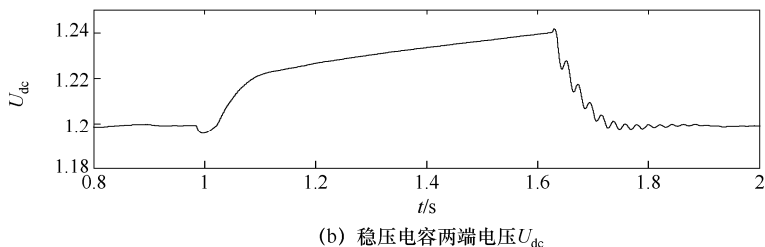
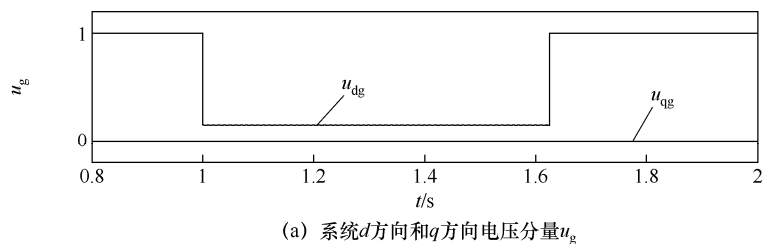
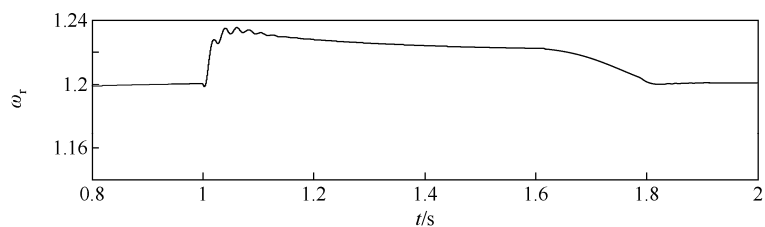
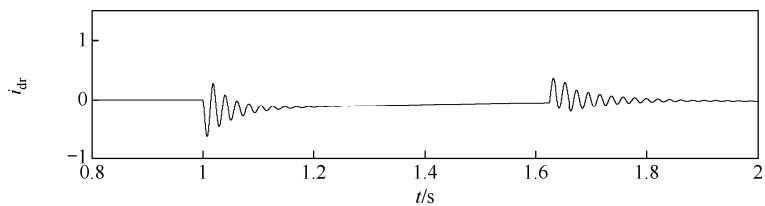


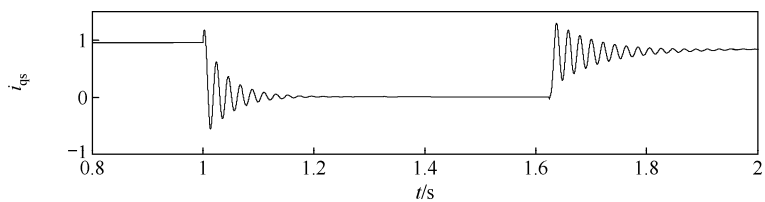
图 5.43 电网三相短路时转矩调节方式仿真



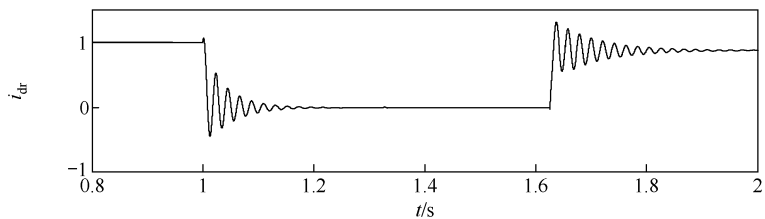
(e) 转子旋转角速度 $\omega_r$



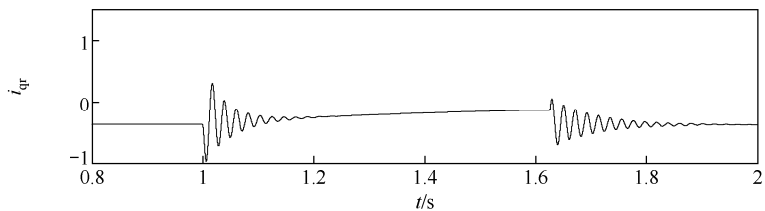
(f) 定子绕组电流 $d$ 方向分量 $i_{dr}$



(g) 定子绕组电流 $q$ 方向分量 $i_{qs}$



(h) 转子绕组电流 $d$ 方向分量 $i_{dr}$



(i) 转子绕组电流 $q$ 方向分量 $i_{qr}$

图 5.43 电网三相短路时转矩调节方式仿真（续）

## 第6章 永磁风力发电机振动及其有限元分析

按照是否有齿轮箱，可对常见的风力发电机组进行分类。风力发电机组中，变速变桨风电机组不仅风能转换效率高，而且能显著降低运行噪声，因此变速变桨风电机组可以向电网提供高质量的电能，通过有效的风电机组控制技术，可以使风电机组的载荷降低。以上这些优点使得变速变桨技术发展成目前风力发电系统的关键技术之一。

变速恒频风力机控制方式较为灵活，它分为双馈风力发电系统和直驱风力发电系统。变速恒频风力机的主要特征是采用变速风轮的螺旋桨，传动系统采用齿轮箱；直驱可变桨距变速恒频技术使用直接耦合传动，发电机采用多极同步电动机和全功率变频设备连接到交流三相电网。直驱系统最重要的性能是稳定，而且其发电效能较为理想。

在叶轮驱动下，通过一个单级增长装置驱动一个多极同步发电机，这是一种直驱和传统风力涡轮机的联合技术。

无论哪种传动方式，风力发电机组的振动和噪声问题都要采取一些有效措施进行抑制。本章着重研究风力发电机的电磁振动及相应的减小措施。

### 6.1 风力系统发电机简介

#### 6.1.1 直驱风力发电机

直驱风力发电机利用风力驱动，使发电机产生电能。这种类型的发电机的极对数较多，发电机转轴和风轮采用直接耦合方式，不需要齿轮箱，因此是一种省去了齿轮箱的直驱发电系统，具有低风速时能够高效发电、系统机械振动小、结构部件损坏概率小、发电机系统占地面积小和维护成本低等特点。

直驱风力发电系统如图 6.1 所示。起初，风轮将风能变为动能传送到发电机，进而把风能变为频率和峰值都不断周期性变化的交流电能进行输出。经过直流环节，最终将电能频率和幅值调节为不变，再与电力系统相连。通过有功功率  $P$  和无功功率  $Q$  的调节，完成对风能的最大利用，从而增大风能转换为电能的效率。

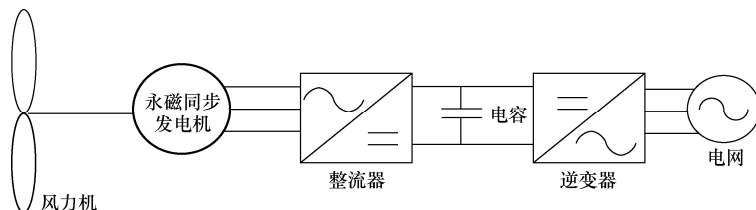


图 6.1 直驱风力发电系统示意图

直驱风力发电系统中的风力发电机分为常规转子电励磁同步发电机和永磁励磁同步发电机两种，图 6.2 是由常规转子电励磁同步发电机组成的风电系统，图 6.3 是由永磁励磁同步发电机组成的风电系统。常规转子电励磁结构发电机必须安装滑环和电刷，因此明显增

大了系统发生故障的概率，加重了系统常规的维护工作。采用永磁励磁同步发电机时，可以不用滑环和电刷，齿轮机构也可以减少，因此维护工作减少，系统可靠性较好<sup>[30~33]</sup>。

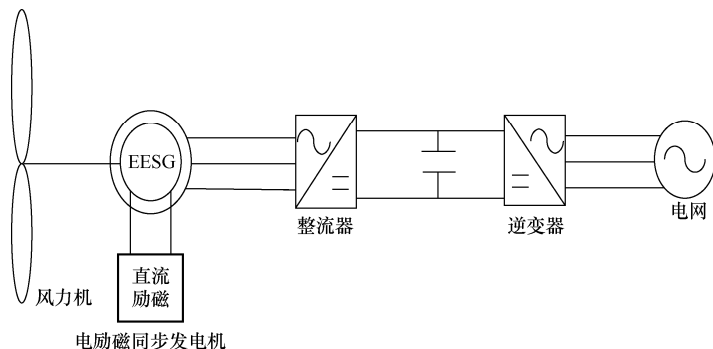


图 6.2 常规转子电励磁同步发电机风电系统示意图

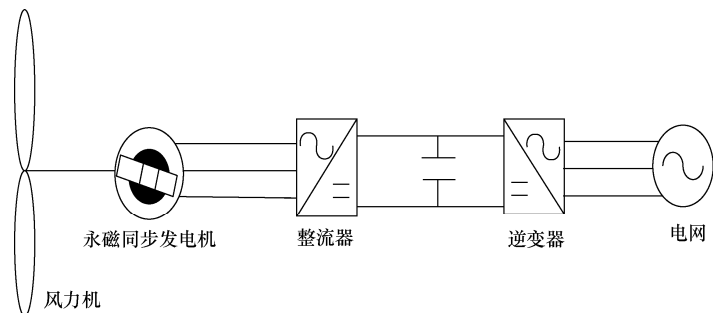


图 6.3 永磁励磁同步发电机风电系统示意图

这种系统很适合在海上发电，因此在海上发电的规模不断扩大。

### 6.1.2 双馈风力发电系统

交流励磁发电机也称双馈发电机。它一般采用定子和转子绕组同时励磁，定子和电力系统相连，转子经过变换装置与电力系统相连，如图 6.4 所示。

双馈风力发电系统的优点如下：

- (1) 能够在调节转速时稳定并网。
- (2) 发电机的有功功率和无功功率可以独立调节。
- (3) 能够合理调节电网电压、电流和发电机的转速。
- (4) 变频器的容量小，使得风电系统的成本大大降低。

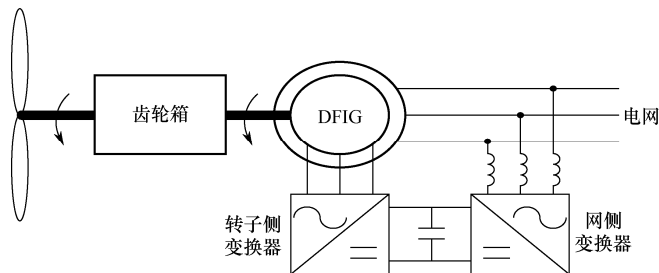


图 6.4 双馈风力发电系统示意图

永磁直驱风力发电系统和双馈风力发电系统的特点如表 6.1 所示。

表 6.1 永磁直驱风力发电系统和双馈风力发电系统的特点

机型和特性	双馈风力发电系统	永磁直驱风力发电系统
系统维护成本	较高（齿轮箱故障多）	低
系统价格	中	高
系统效率	较高	高
电控系统体积	中	较大
变流其容量	全功率的 1/3	全功率变流
变流系统稳定性	中	高
电机滑环	半年换碳刷，两年换滑环	无碳刷、滑环
电机重量	轻	重
电机种类	励磁	永磁，设计时要考虑永磁体退磁问题

（1）双馈风力发电系统能够实现速度可调、频率不变，因此其应用范围更加广泛。

（2）永磁直驱风力发电系统的优点是运行的维护量小，应用范围比较广泛。

同步风力发电机是一种应用广泛的交流风力发电机，其转子速度  $n$  和交流电频率  $f$  之间的关系为  $n = n_0 = 60f/p$ ，其中  $n_0$  是三相旋转磁场的转速， $p$  是发电机定子绕组的磁极对数。

永磁同步发电机和普通同步发电机的区别在于其主磁场由永磁材料提供。永磁同步发电机的特点如表 6.2 所示。

表 6.2 永磁同步发电机的特点

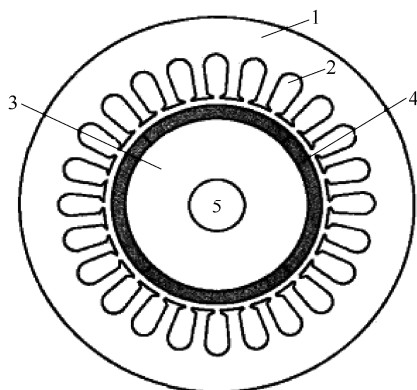
永磁同步发电机组成	说 明
无励磁绕组、电刷和滑环	结构简单，维修量小
无转子励磁	机械摩擦小
永磁材料	气隙磁通密度和功率密度高，重量轻
直轴电枢反应电抗小	电压调整率小
永磁磁场调节困难	永磁磁场调节难以实现，输出电压和无功功率调节困难
使用钕铁硼永磁材料	永磁材料会因环境温度的影响而导致性能不稳定，输出电压调节困难

6.2 永磁同步发电机

6.2.1 结构

永磁同步发电机由定子和转子两部分组成，定子和转子之间存在较小的气隙。图 6.5 是典型永磁同步发电机的结构示意图。

按照转子永磁材料本身安装的位置，永磁发电机转子分为表面式和内置式两种。表面式转子结构的永磁材料安装在转子铁心之上，因此便于设计和加工。相反，内置式转子结构的永磁材料嵌装在转子铁心内，因此加工和制造困难，但转子磁路的不对称能够提供较大的气隙磁场，发电机的过载能力相应较大，同时可以增大发电机输出的功率密度。由于结构的原因，磁场的泄漏较大，可以采用相应的办法来改善。

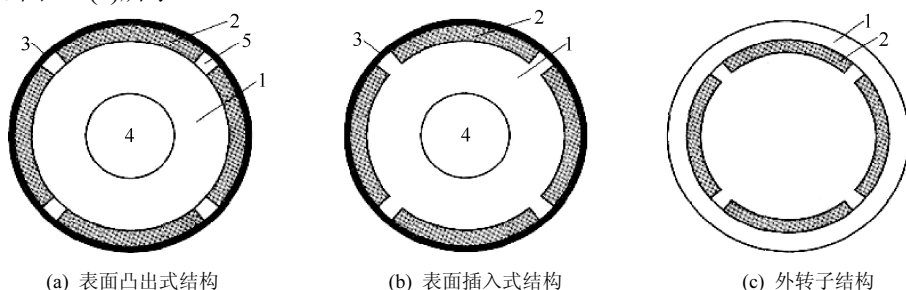


1—定子叠片，2—定子齿槽，3—转子叠片，4—永磁材料，5—转子轴承

图 6.5 典型永磁同步发电机的结构示意图

### 1. 表面式转子结构

依据定子和转子的相对位置，表面式转子结构可以进一步分为内转子结构和外转子结构。内转子结构的转子嵌装在转子铁心内部，具体结构如图 6.6(a)和(b)所示；外转子发电机的结构如图 6.6(c)所示。



(a) 表面凸出式结构

(b) 表面插入式结构

(c) 外转子结构

1—转子叠片；2—永磁材料；3—紧固套环；4—转子轴；5—非磁物质

图 6.6 表面式电机转子

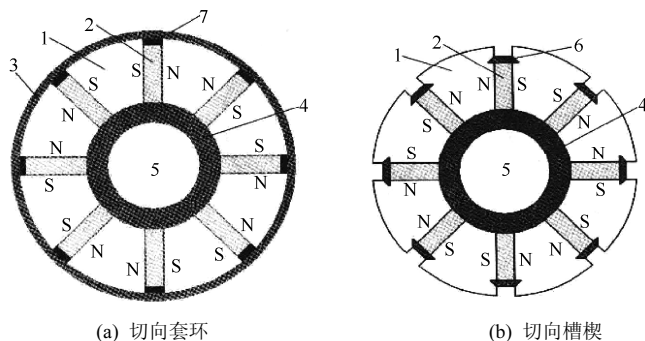
表面凸出式发电机如图 6.6(a)所示，它在各种永磁发电机和永磁同步发电机的设计与制造中采用较多。表面凸出式发电机的交轴和直轴磁阻大致相同，能够调整永磁体来使气隙磁场为正弦，显著减小谐波。表面插入式结构如图 6.6(b)所示，其漏磁较大，因此很少采用。

永磁材料的形状通常适合嵌在转子铁心的表层上。永磁体的抗拉强度远低于抗压强度，在内转子结构中，高速运行时产生的离心力接近甚至超过永磁材料的抗拉强度，因此材料经常会被破坏，旋转作用会使永磁材料与转子表面松动，所以须在转子外增加固定装置。图 6.6(c)所示为外转子结构发电机结构。

### 2. 内置式转子结构

内置式转子结构通常采用切向式转子结构，如图 6.7 所示。采用紧固装置将转子各部件紧固在一起，图 6.7 中用槽楔固定永磁材料，这种结构在中低速或小功率发电机经常采用。





1—转子叠片, 2—永磁材料, 3—套环, 4—非磁套, 5—转轴, 6—非磁槽楔, 7—非磁垫片

图 6.7 内置式转子结构

## 6.2.2 永磁同步发电机的运行原理

### 1. 空载运行

永磁同步发电机三相绕组断开, 定子绕组电流为 0, 即发电机空载运行。

空载运行时定子绕组电流为 0, 发电机内部磁场只有永磁材料输出, 分为主磁通  $\Phi_\delta$  和漏磁通  $\Phi_\sigma$  两部分。主磁通  $\Phi_\delta$  经过气隙与定子三相交流绕组和永磁材料相交链, 感应出定子电动势。

转子转动时, 会在气隙中形成旋转磁场, 进而在定子绕组中产生频率为  $f = pn/60$  的电动势 ( $p$  是电机磁极的极对数;  $n$  是发电机的转子速度, 单位是 rpm), 其大小是

$$E_0 = 4.44NK_n f \Phi \quad (6.1)$$

式中,  $NK_n$  为定子每相绕组匝数。

图 6.8 是永磁直驱发电机的空载电压特性, 它是一条与转速成正比的直线。

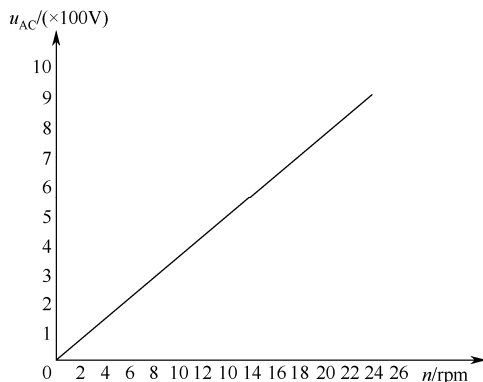


图 6.8 永磁直驱发电机的空载电压曲线

空载特性是永磁发电机的基本特性, 利用它可以确定发电机自身的数据。

### 2. 负载时的电枢反应

永磁同步发电机空载运行时, 气隙只有主磁极的励磁磁动势, 绕组中无电流, 因此不会产生电枢磁动势。

发电机带负载运行, 定子绕组有电流流过, 此时电枢和永磁体二者磁动势互相作用。显然, 永磁体产生的磁动势恒定, 其大小此时被电枢反应磁动势作用产生影响, 这就是电枢反应。

通过上述分析可知,电枢反应会影响气隙磁场,也会影响发电机的电磁性能。具体而言,电枢反应的作用有三种,分别是加大磁场的作用、减小磁场的作用和交磁作用。具体是哪种作用起决定作用,取决于磁动势和永磁磁势的相对位置。

### (1) $I$ 与 $E_0$ 同相 ( $j=0$ ) 时的电枢反应

图 6.9 是  $I$  与  $E_0$  同相 ( $j=0$ ) 时的电枢反应。为简单起见,图中电枢绕组的每相都用匝数为  $N_1 k_{n1}/p$  的等效整距集中线圈来表示。这是因为对任何发电机而言,不论其极对数和绕组形式如何,它所产生的基波电动势或磁动势的数值都和匝数为  $N_1 k_{n1}/p$  的整距集中绕组等效。将转子画成凸极式,只考虑永磁和电枢磁动势基波,不考虑其他高次波形, A 相磁动势达到峰值时, A 相滞后转子  $d$  轴  $90^\circ$ 。转子在定子中感应三相电动势  $E_{OA}$ 、 $E_{OB}$ 、 $E_{OC}$ , A 相电动势从 X 指向 A, B 相电动势从 B 指向 Y, C 相电动势从 C 指向 Z。如果选定正方向是绕阻尾端朝向首端,那么  $e_{OA}$  为正,  $e_{OB}$  和  $e_{OC}$  都为负。由于线圈中感应电动势的数值和线圈所处的磁场位置有关,依照 A、B、C 三相绕组所处的位置,在图中所示瞬间有  $e_{OA} = +E_m$ ,  $e_{OB} = -E_m/2$ ,  $e_{OC} = -E_m/2$ 。如果把 A 相轴线作为参照,那么可得三相电动势  $E_{OA}$ 、 $E_{OB}$ 、 $E_{OC}$ ; 因为  $j=0$ ,  $I$  与  $E_0$  相位相同,所以能够得到三相电流  $I_A$ 、 $I_B$  和  $I_C$ 。因为 A 相励磁电动势此时达到峰值,  $j=0$ , 所以 A 相电流  $I_A$  也达到峰值。这种电枢反应就是交轴电枢反应。

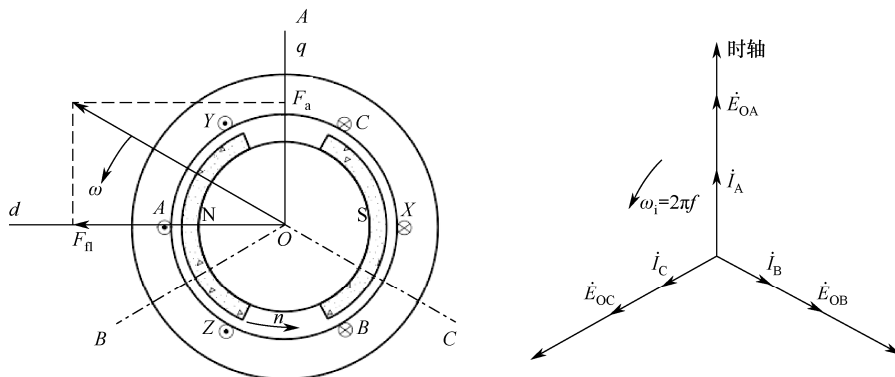


图 6.9  $I$  与  $E_0$  同相 ( $j=0$ ) 时的电枢反应

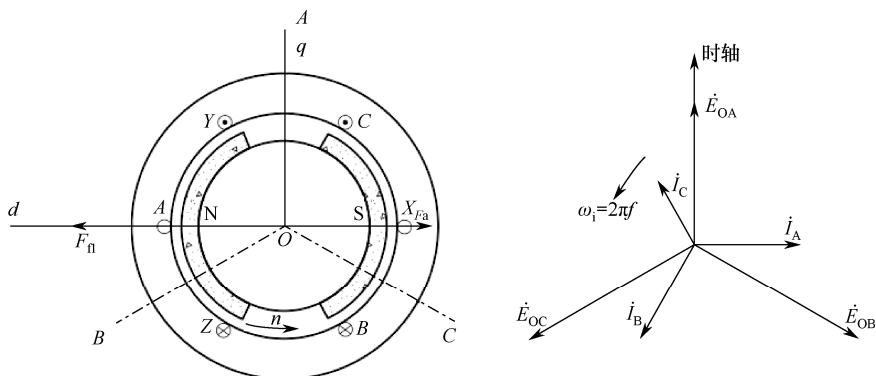
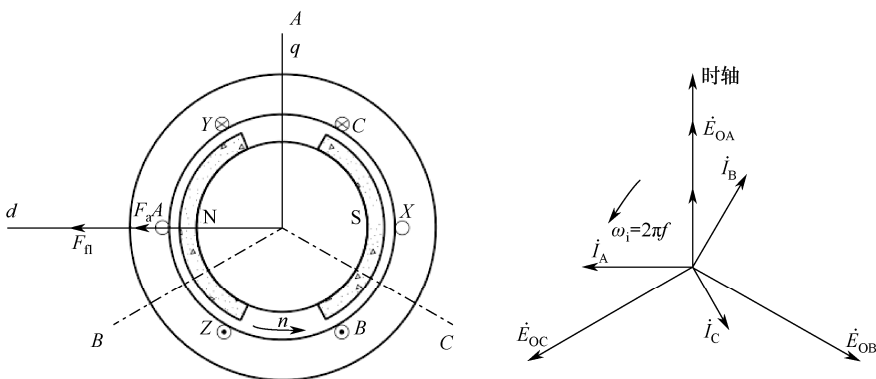
在图 6.9 中,把两个空间相差  $90^\circ$  的向量  $F_{\Omega}$  和  $F_a$  相加得到气隙合成磁动势向量  $F_\delta$ , 则  $F_\delta$  较空载气隙合成磁动势 (即励磁磁动势)  $F_{\Omega}$  后移一个锐角, 即交轴电枢反应能将气隙合成磁场幅值变大。

### (2) $I$ 滞后 $E_0 90^\circ$ ( $j=+90^\circ$ ) 时的电枢反应

图 6.10 为  $I$  滞后  $E_0 90^\circ$  ( $j=+90^\circ$ ) 时的电枢反应。此时, 定子三相电流和励磁电动势的向量图如图 6.10 所示, 三相电流瞬时值的方向如图 6.10 所示。如图所示, 电枢磁动势落后励磁磁动势  $180^\circ$ , 此时  $F_{\Omega}$  和  $F_a$  反向, 其合成磁动势  $F_\delta$  表明  $F_a$  致使气隙磁场减弱。这时磁动势  $F_a$  处在  $d$  轴上, 直轴电枢反应磁动势  $F_{ad}$  只起去磁作用。

### (3) $I$ 超前 $E_0 90^\circ$ ( $j=-90^\circ$ ) 时的电枢反应

图 6.11 为  $I$  超前  $E_0 90^\circ$  ( $j=-90^\circ$ ) 时的电枢反应。这时  $F_a$  和  $F_{\Omega}$  的相位相同, 表明  $F_a$  使得气隙磁场增加。由于  $F_a$  仍位于直轴 ( $d$  轴) 上, 两者相加得气隙合成磁动势, 因此同向直轴电枢反应起增磁作用。


 图 6.10  $I$  滞后  $E_0$   $90^\circ$  ( $j = +90^\circ$ ) 时的电枢反应

 图 6.11  $I$  超前  $E_0$   $90^\circ$  ( $j = -90^\circ$ ) 时的电枢反应

由于直驱风力发电机向电网上输出电力是靠变流器完成的，它在使用可控整流时和上述机理有很大关系。它可以利用可控的导通时间来调控电枢反应，但任何一台永磁发电机都可能发生短路，比如变流器故障、线路故障等。然而，绝不能因此而使磁钢局部失磁或发电机结构损坏，而且电枢反应本身也需要发电机有相当好的特性。

### 6.2.3 永磁发电机振动机理及其分析方法研究

#### 1. 振动产生的原因

齿槽转矩具有永磁发电机定子绕组电流为 0 时的振动特点。永磁风力发电机运转时，齿槽转矩不仅能够使转矩产生周期性的波动，而且会引起系统部件振动和电磁噪声，这些都会影响风电系统的运行效率。

永磁体材料和发电机定子、转子相对运动时，永磁风力发电机中的永磁体与发电机定转子齿或槽之间会产生相互作用的切向力。由此产生的齿槽振动会迫使永磁磁极和齿槽位置对齐。齿槽转矩的形成只与永磁体和发电机的齿槽有关，即绕组中的电流为 0。这就是齿槽转矩产生的原因。

齿槽转矩是由永磁磁极与电枢齿槽作用力的切向分量的变动产生的，它总是与电枢齿和永磁体趋于一致。图 6.12 显示了永磁发电机的结构，图中没有齿槽转矩。而在图 6.13 中，存在试图使永磁体恢复到图 6.12 所示位置的力，即齿槽转矩。

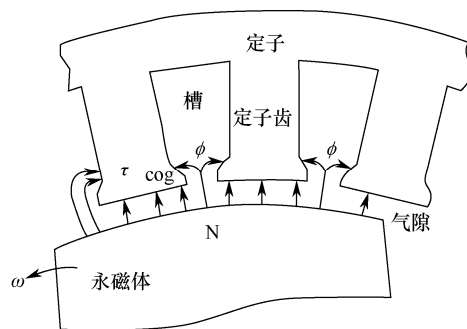
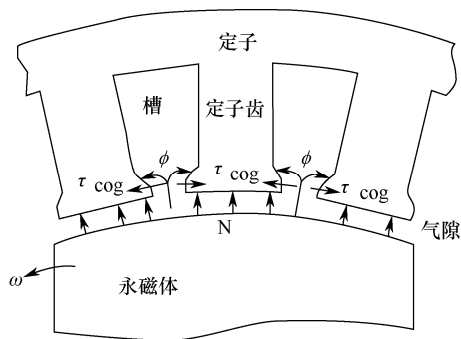


图 6.12 永磁磁极的中心线与定子槽的中心线重合 图 6.13 永磁磁极的中心线与定子槽的中心线不重合

图 6.14 表明当转子逆时针方向转动时,永磁磁极的中心线将滞后于转子齿的中心线,如图 6.14(b)所示。随着转子齿的中心线与定子磁极的中心线之间夹角的变大,如图 6.14(c)所示,转子齿两侧引力的切向分量相互抵消,如图 6.14(d)所示。另外半个周期与上述情况相同。

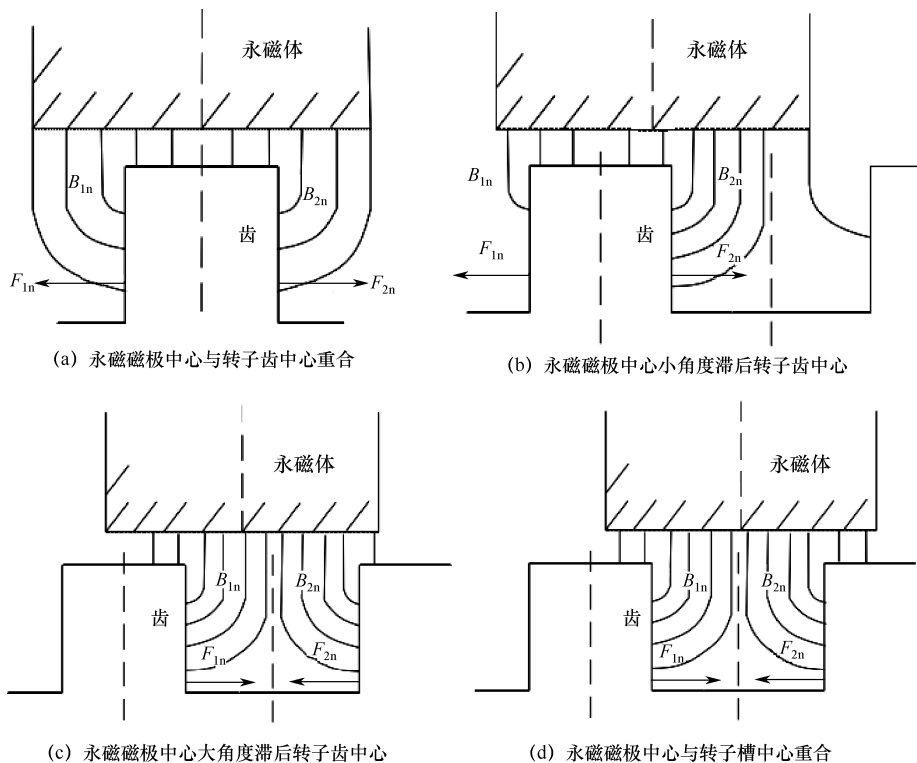


图 6.14 永磁磁极与转子相对位置变化示意图

下面举例说明一个周期内齿槽转矩的变化。设有一个 2 极 4 槽的永磁发电机模型,图 6.15 为该发电机模型定转子相对转动示意图。由图 6.15 可知,在一个齿槽转矩周期内,当永磁发电机的永磁体与发电机的齿中心线在某点重合时,齿槽转矩为零的点称为定位点,在图 6.15 中为  $a$  点。两侧的定子齿中会经过大量磁通,齿槽转矩为 0,如  $a$  点和  $d$  点所示。在两个定位点之间,存在齿槽转矩幅值最大的点,如  $b$  点。

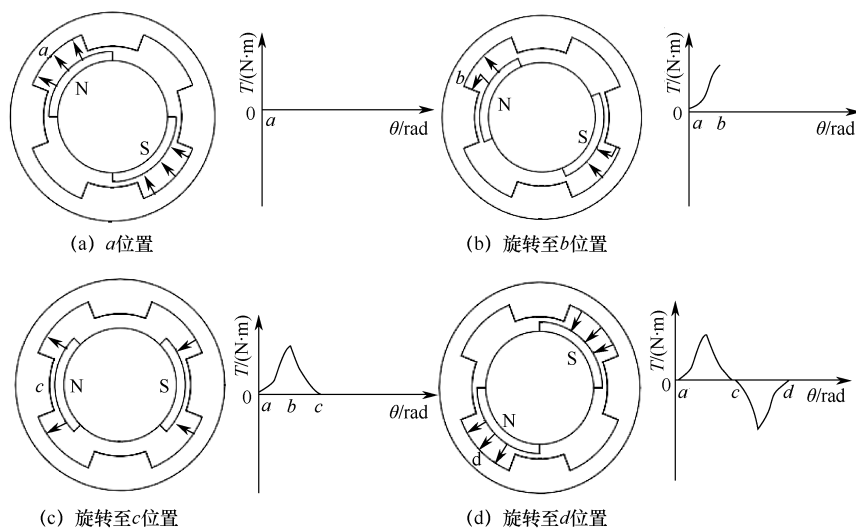


图 6.15 齿槽转矩的周期变化

## 2. 齿槽转矩分析方法

目前计算和分析齿槽转矩的方法很多,主要有以下三种:虚位移法(又称能量法)、麦克斯韦应力张量法和有限元分析法。

### (1) 能量法

在发电机运动过程中,定子和转子之间存在相对位移,这时在永磁发电机中,和永磁体极弧部分相对的电枢齿与永磁体间的磁导基本不变,在永磁体两侧,相应的电枢齿磁导是变化的,会改变发电机磁场储能大小,形成齿槽转矩。因此,齿槽转矩通常是永磁发电机的电枢绕组电流为 0 时,仅由永磁体提供的磁场能量对定子相对角的负导数,其关系为

$$T_{\text{cog}} = -\frac{\partial W}{\partial \alpha} \quad (6.2)$$

式中,  $W$  是磁场能量,  $\alpha$  是永磁体的中心线和相应指定齿的中心线之间的夹角。

忽略次要因素后,我们认为电枢铁心的磁导率为无穷大,永磁体的形状和尺寸相同。永磁材料和空气的磁导率相同。铁心的叠压系数为 1。

设  $\theta = 0$  位置在永磁体磁极的中心线上,如图 6.18 所示。发电机内的磁场能量来源于绕组磁场和永磁体提供的磁场能量,即

$$W = W_{\text{air+PM}} = \frac{1}{2\mu_0} \int_V B^2 dV \quad (6.3)$$

式中,  $W_{\text{air}}$  为气隙磁场能量,其大小和发电机与永磁体之间的位置有关;  $\mu_0$  表示真空磁导率。气隙磁通密度为

$$B(\theta, \alpha) = B_r(\theta) \frac{h_m(\theta)}{h_m(\theta) + g(\theta, \alpha)} \quad (6.4)$$

式中,  $B_r(\theta)$  是沿圆周的径向气隙磁通密度,  $h_m(\theta)$  是永磁体在磁化方向沿圆周的分布,  $g(\theta, \alpha)$  是有效气隙长度沿圆周的分布。因此有

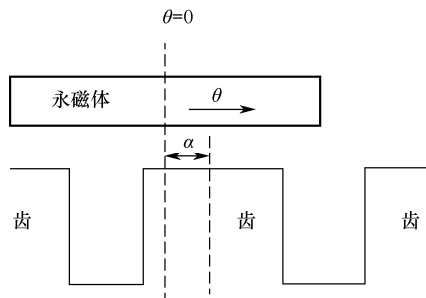


图 6.16 一个磁极与对应的齿槽

$$W = \frac{1}{2\mu_0} \int B_r^2(\theta) \left( \frac{h_m}{h_m(\theta) + g(\theta, \alpha)} \right)^2 dV \quad (6.5)$$

式中,  $B_r(\theta)$  和  $\left( \frac{h_m}{h_m + g(\theta, \alpha)} \right)^2$  可分别推导得到, 进而由傅里叶展开式(6.4)和式(6.5)得到齿槽转矩的表达式:

$$B_r^2(\theta) = B_{r0} + \sum_{n=1}^{\infty} B_{rn} \cos 2np\theta \quad (6.6)$$

式中  $B_{r0} = \alpha_p B_r^2$ ,  $B_{rn} = \frac{2}{n\pi} B_r^2 \sin n\alpha_p \pi$ ,  $\alpha_p$  为永磁体极弧系数。

如果齿中心线正好位于  $\theta = 0$  处, 那么表达式  $\left( \frac{h_m}{h_m + g(\theta, \alpha)} \right)^2$  的傅里叶展开式为

$$\left( \frac{h_m(\theta)}{h_m(\theta) + g(\theta, \alpha)} \right)^2 = G_0 + \sum_{n=1}^{\infty} G_n \cos nQ\theta \quad (6.7)$$

式中,  $G_0$  是初始的傅里叶系数,  $G_n$  是第  $n$  次的傅里叶系数。

如果考虑转子与电枢相对位置的影响, 那么表达式  $\left( \frac{h_m}{h_m + g(\theta, \alpha)} \right)^2$  的傅里叶展开式为

$$\left( \frac{h_m(\theta)}{h_m(\theta) + g(\theta, \alpha)} \right)^2 = G_0 + \sum_{n=1}^{\infty} G_n \cos nQ(\theta + \alpha) \quad (6.8)$$

$$G_{n0} = \left( \frac{h_m}{h_m + g} \right)^2$$

$$G_n = \frac{2}{n\pi} \left( \frac{h_m}{h_m + g} \right)^2 \sin \left( n\pi - \frac{nQ\theta_{s0}}{2} \right)$$

式中,  $\theta_{s0}$  是以弧度为单位的电枢槽口宽。

由以上分析可知, 永磁发电机的齿槽转矩表达式可表示为

$$T_{\text{cog}}(\alpha) = \frac{\pi Q L_{\text{Fe}}}{4\mu_0} (R_2^2 - R_1^2) \sum_{n=1}^{\infty} n G_n B_{r \frac{nQ}{2p}} \sin(nQ\alpha) \quad (6.9)$$

式中,  $L_{\text{Fe}}$  为电枢铁心轴向的长度;  $R_1$  和  $R_2$  分别为发电机电枢外半径和定子轭内半径;  $n$  是使得  $nQ/(2p)$  的比值为整数的整数。

由  $B_{rn} = \frac{2}{n\pi} B_r^2 \sin n\alpha_p \pi$  可得

$$B_{r \frac{nQ}{2p}} = \frac{4P}{nQ\pi} B_r^2 \sin \frac{nQ}{2P} \alpha_p \pi \quad (6.10)$$

(2) 麦克斯韦应力张量法

这种方法用面积力代替体积力来进行分析。定子和转子的电磁力切向密度为

$$f_t = \frac{1}{\mu} B_n B_t \quad (6.11)$$

发电机的电磁转矩主要来自切向力，因此电磁转矩沿半径为  $r$  的圆周积分可以表示为

$$T_{\text{em}} = \frac{2pL_{\text{ef}}}{\mu_0} \int_{\theta_1}^{\theta_2} r^2 B_r B_\theta d\theta \quad (6.12)$$

通过以上分析可知，从发电机槽口中心线与磁极中心线重合处开始，如果转子的角度变化，那么能够逐点计算相应的齿槽转矩数值。

### (3) 有限元分析法

这种方法首先将整个电机的求解区域分割为大量的较小区域，即“单元”或“有限元”，然后用经典的有限元法和变分原理来求解问题。具体步骤是，将要求解的问题等效为经典的变分问题和函数的极值求解；通过常规的剖分和插值，把离散形式的变分问题转换为常规的多元函数求解极值，形成一组多元的代数方程组，最后求解方程组得到边值问题的数值解。以变分原理为基础建立的有限元法，由于理论依据具有普遍性，因此不仅广泛应用于各种结构工程，耐用作作为一种通用的数值计算方法被普遍用来求解许多其他工程领域中的问题。

对发电机应用有限元法时，为获得较高的计算精度，人们近年来组合使用了有限元法与边界元法。通过大量研究与实践，发电机领域的有限元法日臻成熟，逐渐发展为当今工程电磁研究领域的重要方法。有限元法的优点及适用场合如表 6.3 所示。

表 6.3 有限元法的优点及适用场合

有限元法的特点	适用场合
离散方程精度高	特别适合计算机软件的运算，有利于问题的计算求解
媒质的分界面多且适用性强	容易解决内部媒质交界问题和第二类齐次边界问题，适用于电机电磁场的分析和计算
网格的剖分形式多样	可以解决电磁场的各类线性情况
程序一致	很容易通用

有限元法求解电磁场问题的过程如图 6.17 所示。

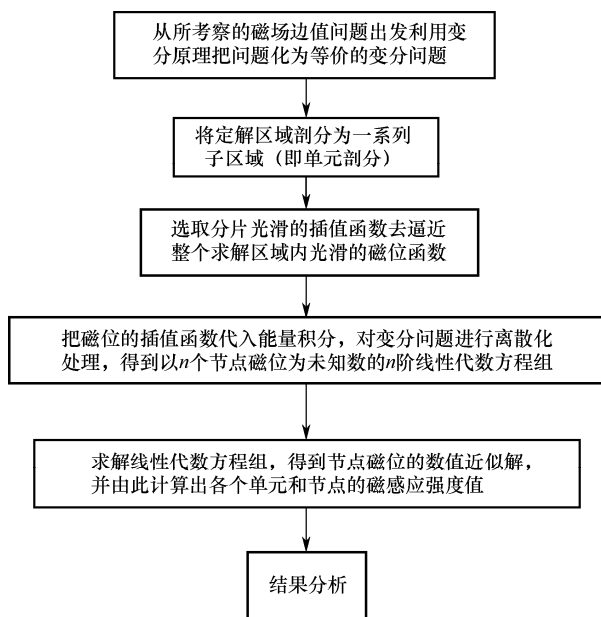


图 6.17 有限元法求解电磁场问题的过程

优化设计风力发电机的本体结构,可在满足性能要求的同时,通过调整发电机的参数来削弱发电机齿槽转矩,进而降低发电机组的振动。

## 6.2.4 基于能量法的永磁发电机齿槽转矩削弱原理

### 1 齿槽转矩削弱方法

由式(6.8)可知,降低永磁发电机齿槽转矩的方法有如下三种。

(1) 调整转子槽尺寸。调整转子的磁极尺寸,即改变  $B_m$  的最大值,可以减小齿槽转矩,其大致包括调节转子齿宽、转子不等槽口宽配合等。

(2) 调节定子侧参数。调节定子侧参数可减小  $G_n$  的最大值,进而有效减小齿槽转矩。这种方法包括调节定子槽口的宽度、定子斜槽等。

(3) 定子槽数和极数变化调整、定子槽数和转子槽数调整。该方法可以调整极数和转子槽数,同时改变  $B_m$  和  $G_n$  的次数与大小,减小齿槽转矩。

### 2 齿槽转矩降低原理

以下分析改变转子侧参数时,改变转子槽参数来减小齿槽转矩的基本原理。

由于定转子齿是发电机磁路的一部分,因此通过调整永磁同步发电机的转子齿宽,能够调节  $B_m$  的最大值,进而减小振动。

(1) 对于转子是切向结构的永磁发电机,设  $\theta = 0$  时它正好位于齿的中心,为了使  $B_r^2(\theta)$  为偶函数,须让  $B_r^2(\theta)$  沿发电机圆周分布,如图 6.18 所示。

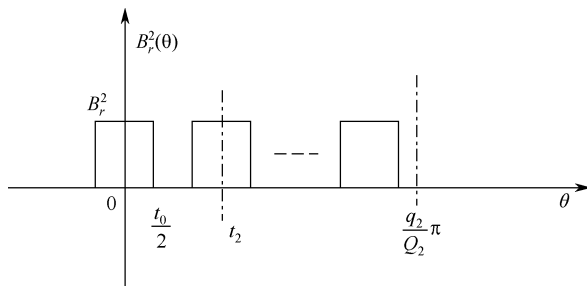


图 6.18  $B_r^2(\theta)$  沿发电机圆周分布

图中,转子齿距  $t_2 = \frac{2\pi}{Q_2}$ 。由此可得  $B_r^2(\theta)$  的傅里叶展开式为

$$B_r^2(\theta) = B_{r0} + \sum_{n=1}^{\infty} B_{rn} \cos nQ_2\theta \quad (6.13)$$

发电机齿槽转矩的表达式为

$$T_{\text{cog}}(\alpha) = \frac{\pi z L_{\text{Fe}}}{4\mu} (R_2^2 - R_1^2) \sum_{n=1}^{\infty} n G_n B_{r \frac{nz}{Q_2}} \sin nz\alpha \quad (6.14)$$

式中,  $R_2$  是定子轭内径,  $R_1$  是转子外径,  $L_{\text{Fe}}$  是定子心的轴向长度,  $q_2$  是每极每相槽数,  $q_2 = Q_2/(2p)$ 。对于 W 形结构,  $n$  是使得  $nzq_2/Q_2$  是一个整数的整数。对于 IPM 结构,  $n$  是使得  $nz/Q_2$  是一个整数的整数。



$$B_r^2(\theta) \text{ 的分解系数为 } B_{r0} = \frac{t_0}{t_2} B_r^2 \quad (6.15)$$

$$B_{rn} = \frac{2B_r^2}{n\pi} \sin \frac{t_0}{t_2} n\pi \quad (6.16)$$

令

$$B_{r \frac{nzq_2}{Q_2}} = 0 \quad (6.17)$$

由式(6.17)可得

$$\frac{t_0}{t_2} = \frac{kQ_2}{nz} \quad (6.18)$$

满足上式的转子齿宽能够减少齿槽转矩, 因为  $B_r(\theta)$  的谐波等于零。其中  $t_0$  是转子齿宽,  $t_2$  是转子齿距。

(2) 对于转子是 W 形结构的永磁发电机,  $B_r^2(\theta)$  可分两种情况讨论。

第一种情况, 当  $q_2$  为奇数时,

$$B_r^2(\theta) = B_{r0} + \sum_{n=1}^{\infty} B_{rn} \cos n \frac{Q_2}{q_2} \theta \quad (6.19)$$

齿槽转矩的表达式为

$$T_{\text{cog}}(\alpha) = \frac{\pi z L_{\text{Fe}}}{4\mu} (R_2^2 - R_1^2) \sum_{n=1}^{\infty} n G_n B_{r \frac{nzq_2}{Q_2}} \sin nz\alpha \quad (6.20)$$

$B_r^2(\theta)$  的分解系数为

$$B_{r0} = \left( \frac{t_0}{t_2} - \frac{t_0}{\tau} \right) B_r^2 \quad (6.21)$$

$$B_{rn} = \frac{4B_r^2}{n\pi} \sin n \frac{Q_2}{2q_2} t_0 \sum_{i=1}^{\frac{q_2-1}{2}} \cos \left( \frac{2n\pi}{q_2} i - \frac{n\pi}{q_2} \pi \right) \quad (6.22)$$

第二种情况, 当  $q_2$  为偶数时,

$$B_r^2(\theta) = B_{r0} + \sum_{n=1}^{\infty} B_{rn} \cos n \frac{Q_2}{q_2} \theta \quad (6.23)$$

齿槽转矩的表达式为

$$T_{\text{cog}}(\alpha) = \frac{\pi z L_{\text{Fe}}}{4\mu_0} (R_2^2 - R_1^2) \sum_{n=1}^{\infty} n G_n B_{r \frac{nzq_2}{Q_2}} \sin nz\alpha \quad (6.24)$$

$B_r^2(\theta)$  的分解系数为

$$B_{r0} = \left( \frac{t_0}{t_2} - \frac{t_0}{t} \right) B_r^2 \quad (6.25)$$

$$B_{rn} = \frac{2B_r^2}{n\pi} \left( \sin n \frac{Q_2}{2q_2} t_0 + 2 \sin n \frac{Q_2}{2q_2} t_0 \sum_{i=1}^{\frac{q_2-2}{2}} \cos \frac{2n\pi}{q_2} i \right) \quad (6.26)$$

综合以上两种情况, 令

$$B_r \frac{nzq_2}{Q_2} = 0 \quad (6.27)$$

得到

$$\frac{t_0}{t_2} = \frac{kQ_2}{nz} \quad (6.28)$$

可知，若转子齿宽符合式(6.28)的要求，则能保证  $B_r^2(\theta)$  的  $n$  次及  $n$  的倍数次数谐波不出现。因此，将使得  $nzq_2/Q_2$  为整数的  $n$  值代入式(6.28)，可让齿宽恰好使  $B_r^2(\theta)$  的谐波分量消失，进而达到减小齿槽振动的目的。

## 6.3 永磁同步发电机齿槽转矩有限元仿真

### 6.3.1 永磁发电机本体构建

本例将 6 极 54 槽永磁发电机作为模型，利用 Ansoft 有限元仿真软件研究转子齿宽参数与齿槽振动的关系。仿真的永磁发电机的额定功率为 22kW，额定电压为 380V，额定转速为 1000rpm，永久磁铁为 Nd-Fe-B，驱动电源为直流电源，两个磁极的结构是平铺形状和径向磁化。永磁发电机的尺寸如表 6.4 所示。

表 6.4 永磁发电机的尺寸

发电机参数	数 值	发电机参数	数 值
定子外径 (mm)	327	永磁体每极宽度 (mm)	124
定子内径 (mm)	230	永磁体轴向长度 (mm)	220
转子内径 (mm)	90	永磁体厚度 (mm)	6
极对数	6	永磁体剩磁 (T)	1.01
定子槽数	54	矫顽力 (kA/m)	890
转子槽数	42	铁心厚度 (mm)	220

RMxpert 永磁发电机定子基本参数设置对话框如图 6.19 所示。

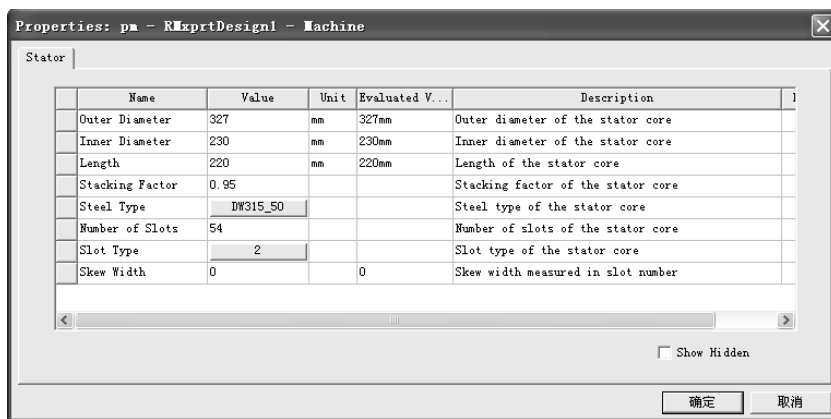


图 6.19 RMxpert 永磁发电机定子基本参数设置对话框

RMxpert 永磁发电机定子槽参数设置对话框如图 6.20 所示。

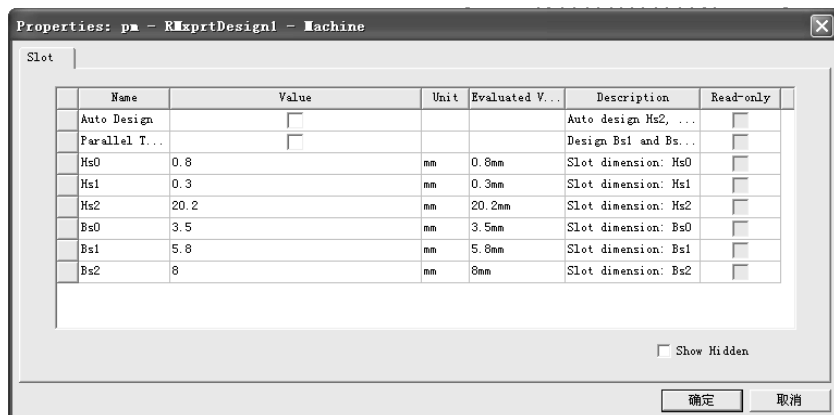


图 6.20 RMxprt 永磁发电机定子槽参数设置对话框

RMxprt 永磁发电机定子绕组参数设置对话框如图 6.21 所示。

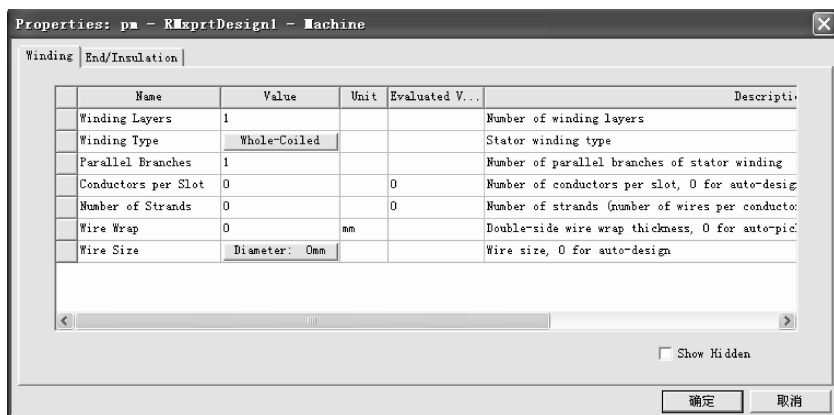


图 6.21 RMxprt 永磁发电机定子绕组参数设置对话框

RMxprt 生成的发电机定子模型如图 6.22 所示。

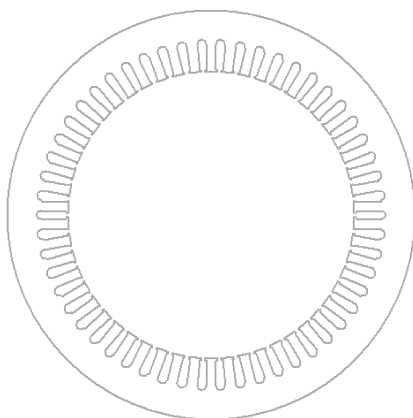


图 6.22 RMxprt 生成的发电机定子模型

RMxprt 永磁发电机转子基本参数设置对话框如图 6.23 所示。

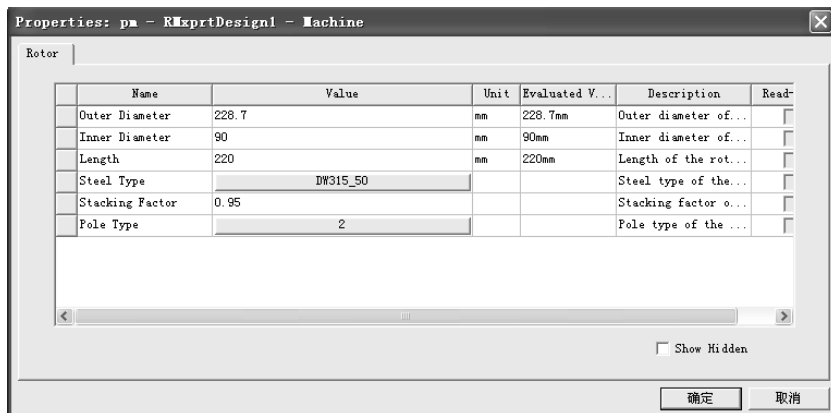


图 6.23 RMxprt 永磁发电机转子基本参数设置对话框

RMxprt 永磁发电机转子磁极参数设置对话框如图 6.24 所示。

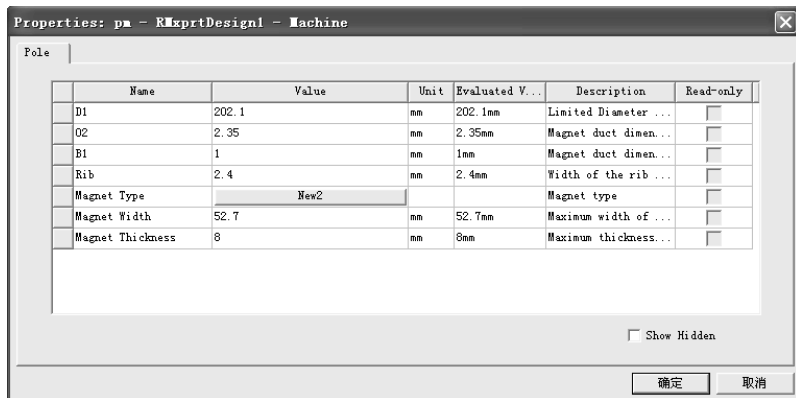


图 6.24 RMxprt 永磁发电机转子磁极参数设置对话框

RMxprt 永磁发电机转子绕组参数设置对话框如图 6.25 所示。

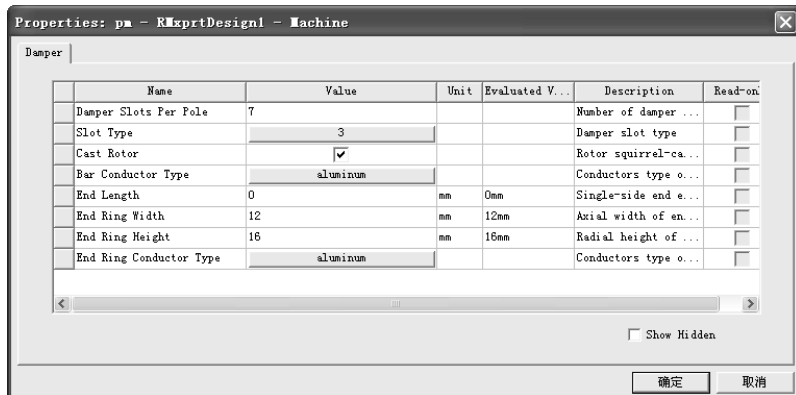


图 6.25 RMxprt 永磁发电机转子绕组参数设置对话框

RMxprt 生成的转子有限元模型如图 6.26 所示。

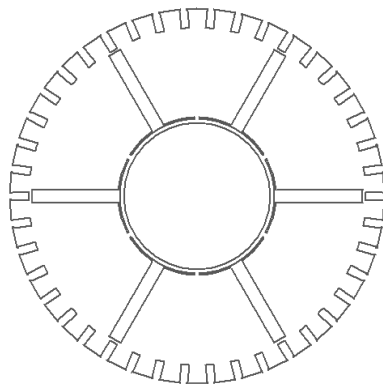


图 6.26 RMxpert 生成的转子有限元模型

切向转子结构永磁发电机的 RMxpert 仿真模型如图 6.27 所示。

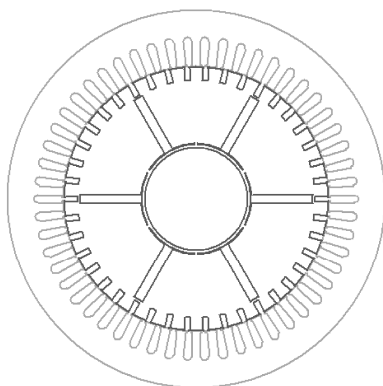


图 6.27 切向转子结构永磁发电机的 RMxpert 仿真模型

Maxwell 2D 仿真模型如图 6.28 所示。

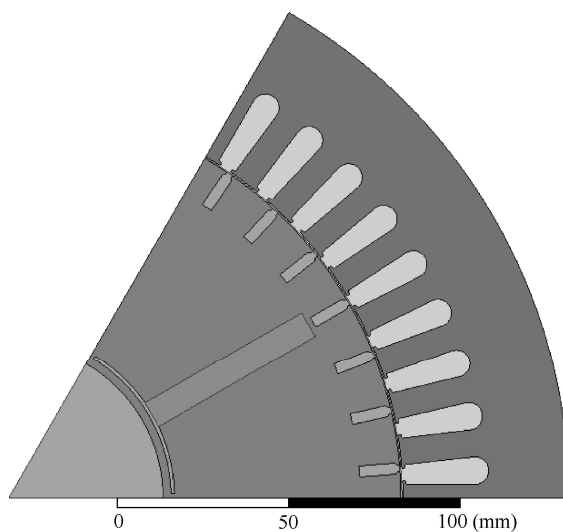


图 6.28 Maxwell 2D 仿真模型

### 6.3.2 齿槽转矩仿真

当转子槽口宽为 1.5mm 时,切向转子永磁发电机齿槽转矩仿真变化曲线如图 6.29 所示。

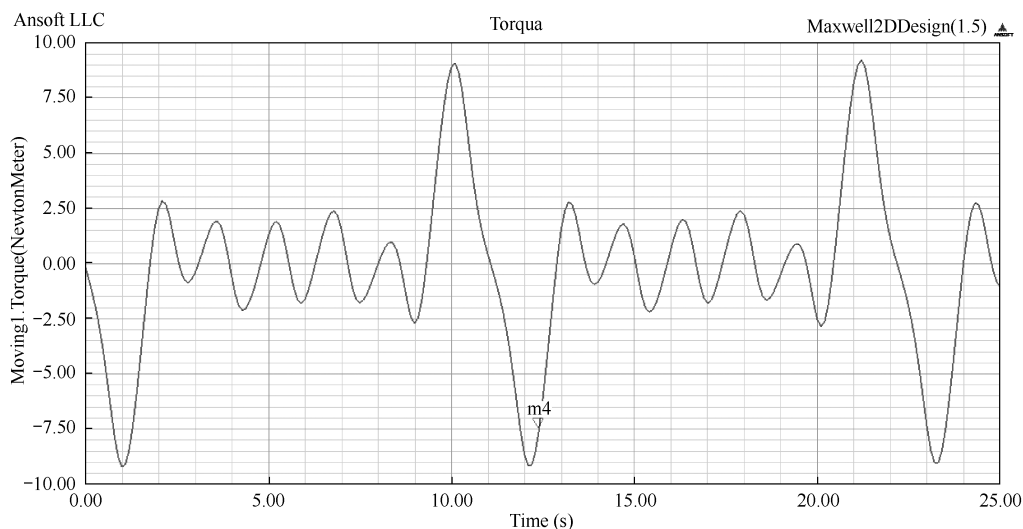


图 6.29 槽口宽为 1.5mm 时切向转子永磁发电机齿槽转矩仿真变化曲线

当转子槽口宽为 4.0mm 时,切向转子永磁发电机齿槽转矩仿真变化曲线如图 6.30 所示。

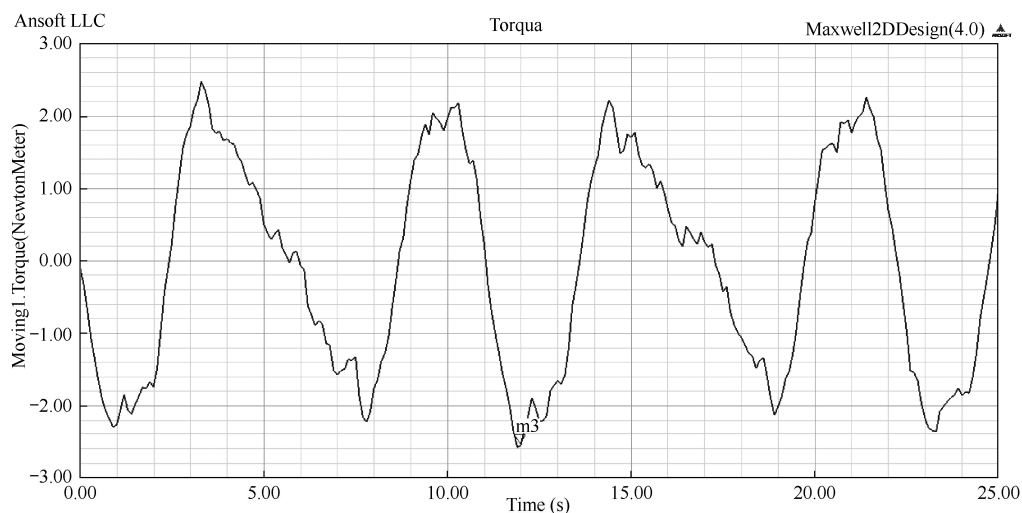


图 6.30 当转子槽口宽为 4.0mm 时切向转子永磁发电机齿槽转矩仿真变化曲线

W 形转子结构永磁发电机的 Ansoft 仿真模型如图 6.31 所示。

转子槽口宽为 1.5mm 时, W 形转子永磁发电机齿槽转矩仿真变化曲线如图 6.32 所示。

转子槽口宽为 4.0mm 时, W 形转子永磁发电机齿槽转矩仿真变化曲线如图 6.33 所示。

对于切向转子槽发电机,  $Q_2 = 42$ ,  $t_0/t_2 = 0.911$ , 根据分析取  $t_0/t_2 = 7/9$ , 仿真曲线如图 6.29 和图 6.30 所示。可知, 切向转子结构发电机的齿槽转矩峰值由  $7.8\text{N}\cdot\text{m}$  降低到  $2.5\text{N}\cdot\text{m}$ , W 形转子结构发电机的齿槽转矩峰值从  $16\text{N}\cdot\text{m}$  降低到  $2.7\text{N}\cdot\text{m}$ , 齿槽振动转矩变化趋势减小。

仿真比较结果表明, 随着转子槽口宽度与转子齿距比值的递减, 齿槽转矩减小。

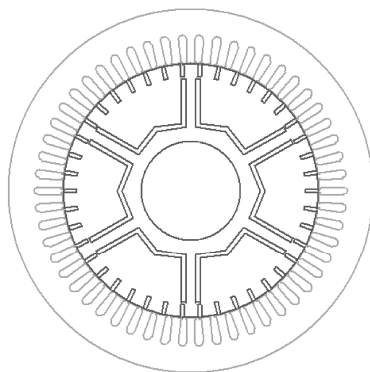


图 6.31 W 形转子结构永磁发电机的 Ansoft 仿真模型

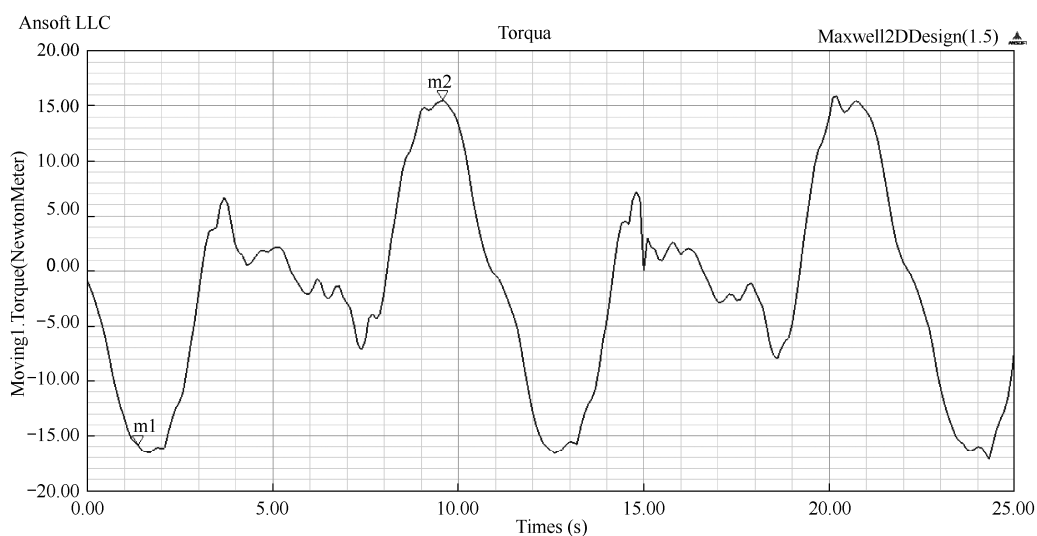


图 6.32 槽口宽为 1.5mm 时 W 形转子永磁发电机齿槽转矩仿真变化曲线

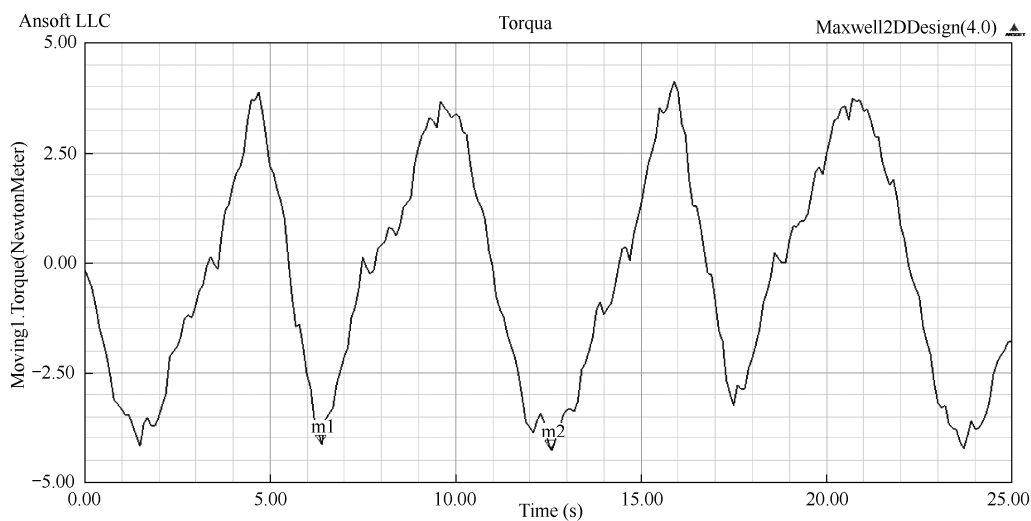


图 6.33 槽口宽为 4.0mm 时 W 形转子永磁发电机齿槽转矩仿真变化曲线

仿真结果表明,优化转子槽宽度与转子齿距之比可以降低齿槽转矩的幅值。选择合适的转子齿宽 ( $T_w$ ) 和转子齿距 ( $T_p$ ), 齿槽转矩将明显下降。另外,还可以采用磁性槽楔法更改槽口的宽度。然而,磁性槽楔块材料的导热性能不是很好,齿槽转矩的减小是有限的。闭口槽方法可使槽口宽度为零。因此,闭口槽方法与磁性槽楔法相比,可以更有效地降低齿槽转矩。

可见,降低转子槽宽度与转子齿距的比值是减小齿槽转矩非常有效的方法之一。

## 6.4 直驱永磁同步风力发电系统 MATLAB 仿真

### 6.4.1 数学建模

直驱永磁同步风力发电系统采用永磁同步发电机和全功率整流逆变器进行控制。为了保证并网时发电机与电网的电压、频率和相序一致,全功率变流器首先采集电网电压、频率和相位参数,然后将其电压信号作为变流器的调制信号,控制变流器的输出电压与升压变压器二次侧的归算电压相同。通常,直驱永磁同步风力发电系统变流器的结构主要有以下两种。一种是不控整流器加网侧 PWM 逆变器,其结构如图 6.34 所示。

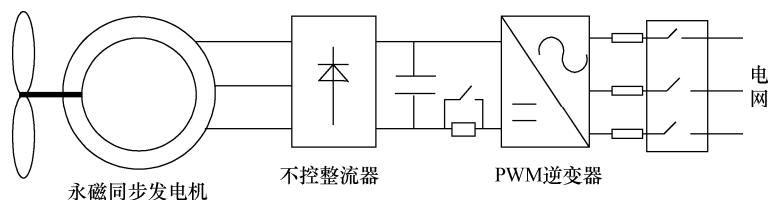


图 6.34 不控整流器与网侧 PWM 逆变器组成的直接并网结构

风力发电机输出的频率和幅值变化的电能经过不可控整流器变为直流后,利用 PWM 电压型逆变器连接到三相电网。网侧 PWM 变换器可以实现能量的双向流动,可以利用并网变换器对电容反向充电实现并网。

另一种是机侧 PWM 整流器加网侧 PWM 逆变器的结构,如图 6.35 所示。

并网型直驱永磁同步风力发电系统的结构如图 6.36 所示,它由风轮、永磁同步发电机和变流装置等组成。

永磁同步风力发电机的数学模型分为静态模型和动态模型两种。静态数学模型不计饱和,永磁同步风力发电机向量图如图 6.37 所示。图中,  $\varphi$  为功率因数角,  $\psi$  为内功率因数角。直轴同步电抗  $X_d = X_{ad} + X$ , 交轴同步电抗  $X_q = X_{aq} + X$ 。电压平衡方程为

$$\dot{E}_0 = U + j\dot{I}_d X_{ad} + j\dot{I}_q X_{aq} + \dot{I}(R_1 + jX_1) \quad (6.29)$$

式中,  $R_1$  是定子电枢绕组电阻,  $X_1$  是定子漏电抗,  $X_{ad}$  是总直轴电抗,  $X_{aq}$  是总交轴电抗,  $I_d$  是电枢电流的直轴电流分量,  $I_q$  是电枢电流的交轴电流分量:

$$I_d = I \cos \psi \quad (6.30)$$

$$I_q = I \sin \psi \quad (6.31)$$

$dq$  旋转同步坐标系中永磁同步风力发电机组的数学模型为



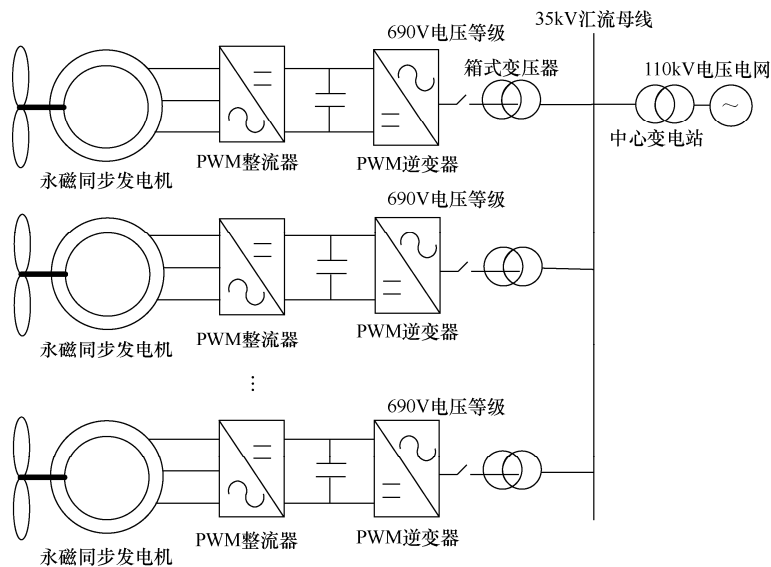


图 6.35 直驱永磁同步发电机组风电场并网结构图

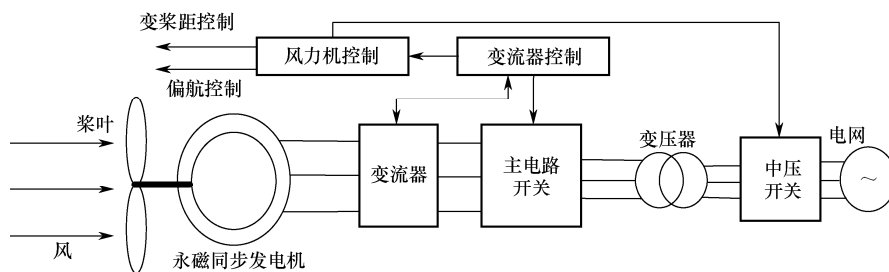


图 6.36 并网型直驱永磁同步风力发电系统结构简图

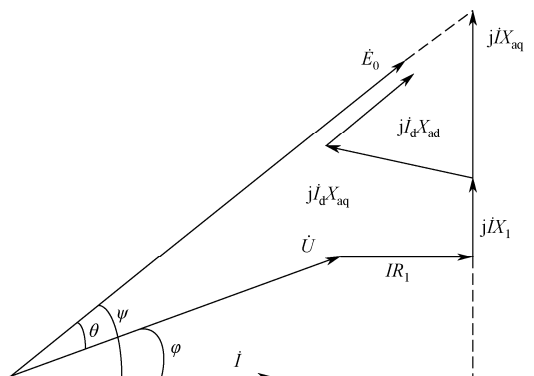


图 6.37 永磁同步风力发电机向量图

$$\begin{cases} \frac{di_d}{dt} = -\frac{R_a}{L_d} i_d + \omega_e \frac{L_q}{L_d} i_q + \frac{1}{L_q} u_d \\ \frac{di_q}{dt} = -\frac{R_a}{L_q} i_q - \omega_e \left( \frac{L_d}{L_q} i_d + \frac{1}{L_q} \psi_0 \right) + \frac{1}{L_q} u_q \end{cases} \quad (6.32)$$

式中, 发电机的  $d$  轴和  $q$  轴电流分别为  $i_d$  和  $i_q$ , 发电机的  $d$  轴和  $q$  轴电感分别为  $L_d$  和  $L_q$ ,  $R_a$  为定子每相电阻,  $\omega_e$  为电角频率,  $\omega_e = n_p \omega_g$ , 发电机的转子极对数为  $n_p$ , 永磁体的磁链为  $\psi_0$ ,  $u_g$  的  $d$  轴和  $q$  轴分量分别为  $u_d$  和  $u_q$ ,  $q$  轴的反电动势  $e_q = \omega_e \psi_0$ ,  $d$  轴的反电动势  $e_d = 0$ 。设  $L_d$  和  $L_q$  均等于  $L$ , 则有

$$\begin{cases} \frac{di_d}{dt} = -\frac{R_a}{L}i_d + \omega_e i_q + \frac{1}{L}u_d \\ \frac{di_q}{dt} = -\frac{R_a}{L}i_q - \omega_e \left( i_d + \frac{1}{L}\psi_0 \right) + \frac{1}{L}u_q \end{cases} \quad (6.33)$$

动态等效电路如图 6.38 所示。

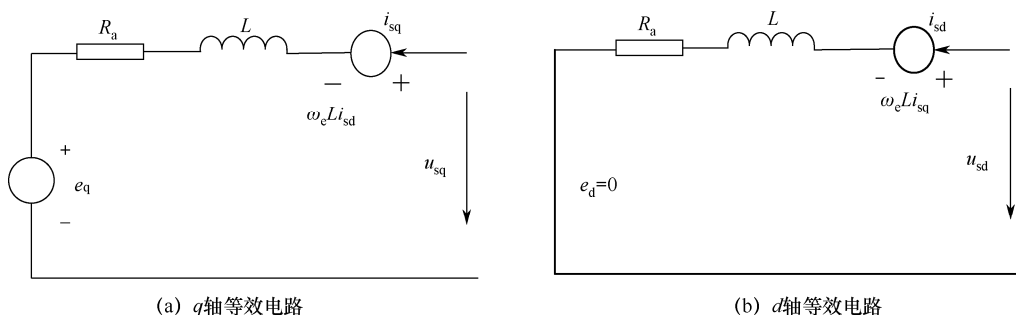


图 6.38 永磁同步风力发电机的动态等效电路

根据上面的数学模型, 可在 MATLAB/Simulink 软件界面建立永磁同步风力发电机仿真模块图, 如图 6.39 所示。

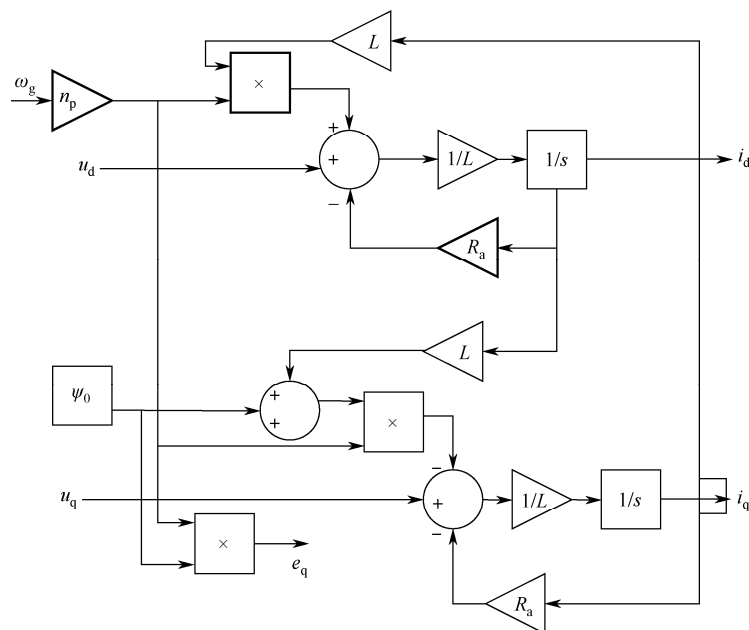


图 6.39 永磁同步风力发电机仿真模块图

### 6.4.2 永磁同步风力发电系统的控制策略

直驱永磁同步风力发电系统产生的有功功率  $P$  的计算公式为

$$P = 3 \left| \dot{V}_g \right| \left| \dot{I}_g \right| \cos \varphi = \frac{\pi}{6} (1 - \alpha) R_L \frac{(Kf\omega_g)^2}{\left\{ \frac{\pi^2}{18} (1 - \alpha)^2 R_L + R_a \right\} + X_s^2} \quad (6.34)$$

直流电压表达式为

$$V_{dc1} = \frac{\pi}{\sqrt{6}} (1 - \alpha) R_L \frac{Kf\omega_g}{\sqrt{\left\{ \frac{\pi^2}{18} (1 - \alpha)^2 R_L + R_a \right\} + X_s^2}} \quad (6.35)$$

升压斩波电路的输出电压为

$$V_{dc2} = \frac{\pi}{\sqrt{6}} (1 - \alpha) R_L \frac{Kf\omega_g}{\sqrt{\left\{ \frac{\pi^2}{18} (1 - \alpha)^2 R_L + R_a \right\} + X_s^2}} \quad (6.36)$$

当电功率最大时，整流器的输出电压和斩波器的输出电压  $V_{dc1}$  与  $V_{dc2}$  为

$$V_{dc1} = \frac{3\sqrt{3}}{\pi} \frac{K\phi\omega_g \sqrt{R_a^2 + X_s^2}}{\sqrt{R_a^2 + X_s^2 + R_a \sqrt{R_a^2 + X_s^2}}} \quad (6.37)$$

$$V_{dc2} = \sqrt{\frac{3R_L}{2\sqrt{R_a^2 + X_s^2}}} \frac{K\phi\omega_g \sqrt{R_a^2 + X_s^2}}{\sqrt{R_a^2 + X_s^2 + R_a \sqrt{R_a^2 + X_s^2}}} \quad (6.38)$$

可得  $R_L$  为

$$R_L = \frac{2}{3} V_{dc2}^2 \frac{\sqrt{R_a^2 + X_s^2} + R_a}{(K\phi\omega_g)^2} \quad (6.39)$$

设  $d$  轴电流参考值  $i_{dref} = 0$ ，定义

$$\begin{cases} u_d = \omega_e L i_q + u_d \\ u_q = -\omega_e L i_d - e_q + u_d \end{cases} \quad (6.40)$$

$$\begin{cases} u_q = (sL + R_a) i_q \\ u_d = (sL + R_a) i_d \end{cases} \quad (6.41)$$

转速控制器的设计如图 6.40 所示。

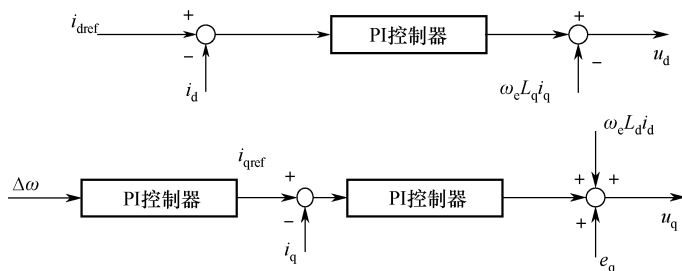


图 6.40 转速控制器的设计

### 6.4.3 仿真分析

搭建的永磁同步风力发电系统仿真模型如图 6.41 所示。

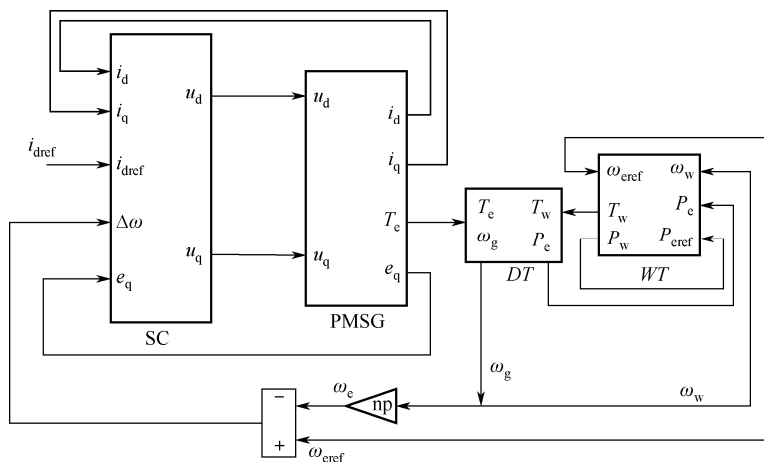


图 6.41 永磁同步风力发电系统仿真模型

永磁同步风力发电系统仿真如图 6.42 所示。

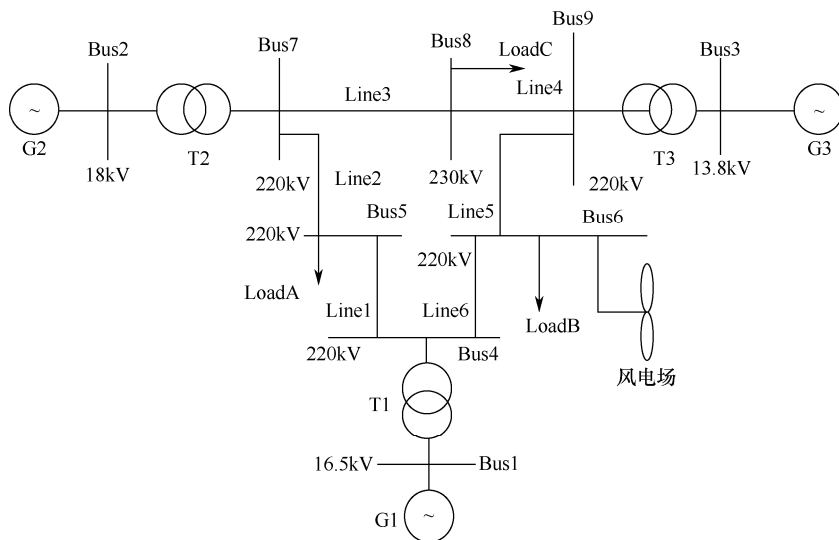


图 6.42 永磁同步风力发电系统仿真

在图 6.42 中，永磁风力发电机的单机容量为 1.5MW。风力机的参数如下：空气密度  $\rho = 1.225\text{kg/m}^3$ ，转子半径  $R = 30\text{m}$ ，叶尖速比  $\gamma = 5$ ，风能利用系数  $C_p = 0.4$ ，额定风速  $V_N = 11\text{m/s}$ 。永磁同步风力发电机的参数如下：额定功率  $P_N = 1.5\text{MW}$ ，额定角速度  $\omega_N = 18\text{m/s}$ ，额定电流  $I_N = 1250\text{A}$ ，定子额定电压  $U_N = 690\text{V}$ 。

双 PWM 变换器的参数如下：直流侧电压  $U_{dc} = 1380\text{V}$ ，直流侧电容  $C = 60\text{mF}$ ，网侧无功设定值为 0。

系统三台发电机的参数如下：G1 输出有功功率 72kW，输出无功功率 25Mvar；G2 输

出有功功率 163kW, 输出无功功率 60Mvar; G3 输出有功功率 85kW, 输出无功功率 30Mvar。系统三台变压器的参数如下: T1 的电压比为 16.5/230, 电抗为  $0.0576\Omega$ ; T2 的电压比为 18/230, 电抗为  $0.0625\Omega$ ; T3 的电压比为 13.8/230, 电抗为  $0.0586\Omega$ 。

电网中三个负荷的参数如下: LoadA 的有功功率为 125kW, 无功功率为 50Mvar; LoadB 的有功功率为 90kW, 无功功率为 30Mvar; LoadC 的有功功率为 100kW, 无功功率为 35Mvar。

电网的系统参数如下: Line1 的等效阻抗为  $(0.01 + j0.085)\text{pu}$ , Line2 的等效阻抗为  $(0.032 + j0.161)\text{pu}$ , Line3 的等效阻抗为  $(0.017 + j0.092)\text{pu}$ , Line4 的等效阻抗为  $(0.039 + j0.17)\text{pu}$ , Line5 的等效阻抗为  $(0.0085 + j0.072)\text{pu}$ , Line6 的等效阻抗为  $(0.0119 + j0.1008)\text{pu}$ 。

由于电网中的短路故障比较常见, 下面对对称的三相短路故障进行仿真。假设仿真在第 2s 时, 输电母线 Bus6 处发生了三相短路故障, 短路点相与相之间的阻抗为  $40\Omega$ , 0.2s 后故障线路两侧的断路器跳闸, 故障清除。三相对称短路风力发电系统仿真的输出如图 6.43 所示。

由图 6.43(a)和(b)可以看出, 三相对称短路时, 风电场输出的有功功率和无功率变化较小; 由图 6.43(c)可以看出, 故障期间转矩波动不大, 表明风电系统的控制效果较好。

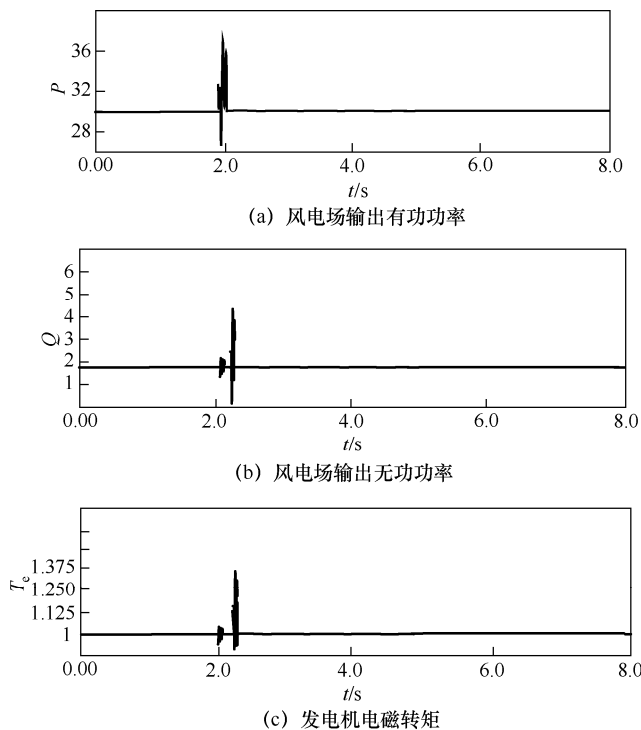


图 6.43 三相对称短路风力发电系统仿真的输出

## 第7章 风力发电技术中的偏航电控系统

风力发电技术中的偏航电控系统的主要功能是，保证风力发电机在整个运行过程中的可靠性，提高风力发电系统的风能转化效率，进而节约风力发电系统发电的初期投资；此外，偏航电控系统还可以对风力发电系统实施保护。因此，风力发电系统中偏航控制部分的优化设计和控制，对整个风力发电系统运行的各项指标和性能的影响很大，所以有必要研究风力发电偏航电控系统的关键部件的性能，掌握和熟练运用风力发电偏航电控系统的调节方式，实现风力发电系统的高效稳定运行。

风力机运行的基本原理来源于贝茨理论。贝茨理论忽略了一些次要因素（如空气对风力机的阻力和空气的摩擦），将风力机的叶轮运行作为理想化模型。此时，叶轮捕获到风能后，由风力发电机将风能转变为机械能。单位时间内穿过风轮扫掠面积的动能，即功率  $P_A$  为

$$P_A = \frac{\rho}{2} A v^3 = \frac{\pi}{8} \rho D^2 v^3 \quad (7.1)$$

式中， $v$  为风速（指未扰动气流的流速），单位为米/秒； $D$  为风轮直径，单位为米； $A$  为风轮叶片扫掠面积，单位为平方米； $\rho$  为空气密度，单位为千克/立方米。

风能利用系数（又称功率系数）是表征风力机效率的重要参数，它表示风力机吸收的来自风力流动的可用部分的能量比例。由贝茨理论可知，风能利用系数的峰值通常是 0.593。水平轴风力机的利用系数  $C_p = 0.2 \sim 0.5$ ，垂直轴风力机的利用系数  $C_p = 0.3 \sim 0.4$ 。

风力机的功率定义为其将风能转化为可用机械能的功率：

$$P = C_p \frac{\rho}{2} A v^3 \quad (7.2)$$

由式(7.1)和式(7.2)可以看出：

(1)  $v$  为常数时， $P$  与  $D^2$  成正比，即如果风速不变，那么风力机的功率和风轮直径的二次方成正比。

(2)  $D$  为常数时， $P$  与  $v^3$  成正比，即如果风力机的直径不变，那么风力机的功率和风速的三次方成正比。

(3) 如果风轮的直径和风速恒定，那么风轮的功率与  $C_p$  成正比。

(4) 风轮功率和风轮叶片数无关，但与空气密度成正比。

假设此时的风速为  $v$ ，风轮叶片尖端线速度  $\omega_R$  与  $v$  的比值就称为风轮的叶尖速比，即

$$\lambda = \frac{\omega_R}{v} \quad (7.3)$$

式中， $\lambda$  为高速性系数； $\omega$  为风轮在风速为  $v$  时的旋转角速度， $\omega = 2\pi n/60$ ，单位为弧度/秒； $\omega_R$  为风轮叶片尖处的线速度，单位为弧度·秒<sup>-1</sup>·米； $n$  为转速，单位为转/分。所以有

$$\lambda = \frac{\frac{2\pi}{60} n R}{v} = \frac{\pi R}{30v} n \quad (7.4)$$

由此可知, 叶尖速比是反映一定风速下风轮转速高低的参数, 简称 TSR。

风轮的功率是其转矩与旋转角速度的乘积, 即

$$P = M\omega \quad (7.5)$$

式中,  $M$  是转矩, 单位为千克·米;  $\omega$  是旋转角速度, 单位为弧度·秒<sup>-1</sup>。

## 7.1 偏航电控系统简介

(1) 风力发电系统正常运行时, 可以通过控制风轮, 使其始终处于能够最大限度地捕获风能的最佳位置, 即实现自动追踪风能使其转化效率最大化。具体过程表述为: 由于风的流动随机性和不确定性很大, 当风轮和风向的夹角不满足自动发电的最佳设定值时, 偏航控制器就会产生反馈信号并发出相应命令, 偏航系统开始动作, 对准风向来调节角度, 直至角度满足要求, 此时偏航电控系统的自动对准动作停止。

风力发电机组连续地检测风向角度的变化, 并连续计算单位时间内的平均风向, 风力发电机组根据平均风向判断是否需要偏航, 检测到的偏差在允许范围内时, 它不会动作, 从而在风的扰动下有效地避免偏航控制器的频繁动作。

(2) 扭缆时自动解缆。在实际运行过程中, 风力发电机组会出现同一方向偏航角度过大的情形, 造成电缆扭缆, 如果不及时采取措施, 就会发生断缆的风险。因此在控制系统中设定了偏航自动解缆及强制解缆指令。一般情况下, 机舱在同一方向共偏转至 23 周, 且当前风速不大于机组切入风速时, 没有功率产生, 系统不会运转, 这时要进行解缆操作; 如果此时机舱反转达到 23 周, 且当前机组功率有输出时, 就不会自动进行解缆操作, 而要到机组向同一方向偏转达到 3 周, 系统进入停止状态时, 才进行解缆操作。如果由于故障造成解缆失败, 那么当扭缆次数达到 4 圈时, 发出扭缆操作的信号, 系统随即发出扭缆失败信号, 过渡到自动停车操作。只要没有人工解缆, 系统就会一直保持停车状态。

(3) 失速保护功能。遇到特别大的强风时, 为避免风力发电系统部件的损坏, 风力偏航系统进入自动停止状态, 叶尖位置处产生阻尼作用的桨板会被释放, 机组的桨距角达到极大值, 这时进入偏航 90°背风运行, 以避免风力机速度过大而发生损坏。

## 7.2 偏航系统正常运行的条件

### 1. 环境

偏航电控系统的设计应满足的环境条件主要有以下几个方面: 温度和湿度满足设计要求, 阳光辐射强度适中, 雨、雪和冰不能影响控制系统的正常操作, 没有腐蚀器件的化学成分, 机械运动阻力和机构的灵活性能较好, 雾、盐对系统精度控制不会造成误动作, 如果位于近海区域, 还要满足一些特殊的环境要求。

## 2. 电缆

为系统供电的电缆不应受到较大的应力而产生过度的扭曲或断裂，设计和施工过程中要保证电缆可以自然地伸缩，每隔一段长度就要设置支撑部件，电缆的首端和尾端以及中间接头处要留有一定的余量来保证自由度，余量和悬垂的大小要参照电缆所允许的转扭角度来计算。

## 3. 阻尼

为了避免风力涡轮机在偏航过程中产生过大振动和由此带来的整个机器的共振，偏航控制应该保证偏航电控系统具有适当的减振转矩，其大小应根据发电机惯性矩和风力机的总质量确定。基本原则是要确保风力发电机平稳运转而不会产生过大的振动。当控制系统采取一定大小的力矩控制后，风力发电机组的定位就会相对精准，只有如此才能保证风能发电的效率最大化。

## 4. 解缆和扭缆保护

解缆和扭缆保护是风力发电系统偏航电控部分不可缺少的两大功能。

偏航电控系统的偏航运动会使得为机舱和塔架供电的电缆因为运动而缠绕，所以必须设置检测电缆方向，或利用程序中添加的计数装置来进行检测，即偏航电控系统中的电缆保护功能用来检测偏航电控系统的电缆的变形情况。正常运行状态时，对于主动偏航电控装置，检测设备必须保证电缆到达设定的扭转角度之前松开电缆；对于无源偏航电控系统检测装置或类似程序，在电缆达到危险扭转角度之前，应禁止机房继续与电缆一起旋转，并手动松开电缆。只要设备启动，风力涡轮机就必须紧急制动。

## 5. 偏航转速

风力发电系统中，风机轴和叶片轴能够产生回转力矩，影响风机的寿命和安全。为了减小扭矩对风力涡轮机的影响，偏航速度的调节要进行一些机械运动的设计和分析。表 7.1 中列出了偏航调控系统的转速推荐值。

表 7.1 偏航调控系统的转速推荐值

风力发电机组发出功率 (kW)	100~200	250~350	500~700	800~1000	1200~1500
偏航转速 (rpm)	不大于 30%	不大于 18%	不大于 10%	不大于 9.2%	不大于 8.5%

## 6. 液压控制方式

液压装置的功能是使偏航制动器利用液压方式实现松紧操作。

## 7. 制动装置

因为偏航轮齿上作用力的大小时刻变化，通常用偏航阻尼器来减弱偏转的较小变动，进而减轻齿轮受到的冲击或损坏。

## 8. 计数装置

计数装置的功能是实时记录偏航电控转动的圈数，将检测到的数值反馈给控制器，控制器将接收到的反馈值和设定值比较后，决定下一步的操作内容。



9. 润滑

润滑的主要功能是减小驱动齿轮和偏航齿圈的滑动摩擦力。大多数情况下，由润滑脂和润滑油同时产生润滑效果，这会导致润滑液失效，因此需要频繁更新润滑材料。同时，润滑在一定程度上有利于机械部件的散热。

10. 密封

偏航电控系统应该有相应的密闭方法，以使内部的清洁和相邻部件之间的润滑不受影响，同时保证密封油性能良好。

11. 表面防腐蚀

系统暴露在空气表面的部件要进行一定的处理以适应工作环境，其他工作条件也要加以注意。一般会在部件表面均匀涂上防锈漆。

7.3 偏航电控系统结构

偏航电控系统结构包括偏航轴承、偏航电动装置、偏航制动装置、偏航计数器、保护扭缆的装置、偏航的液动装置等，如图 7.1 所示，其实物如图 7.2 所示。

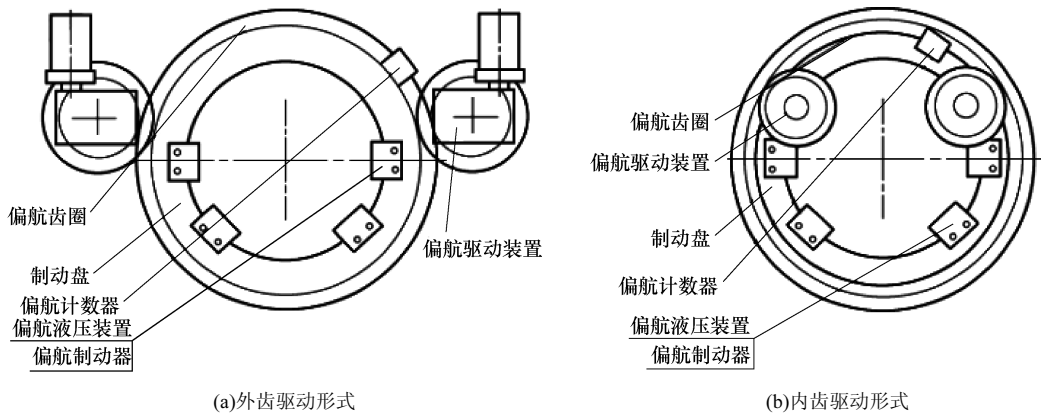


图 7.1 偏航电控系统结构



图 7.2 偏航电控系统实物图

1. 偏航轴承

轴承的内外圈分别和风机系统的机舱与塔体部分采用螺栓进行连接。轮齿为内齿或外

齿方式，有的具备自锁功能，有的设置强制制动，但都应设置阻尼来满足机舱转动时平稳不发生振动的要求。外齿方式下轮齿啮合完整，形式坚固，分别如图 7.3(a)和(b)所示。是否采取内齿或外齿，主要依据系统的具体组成和整体布置进行选择。

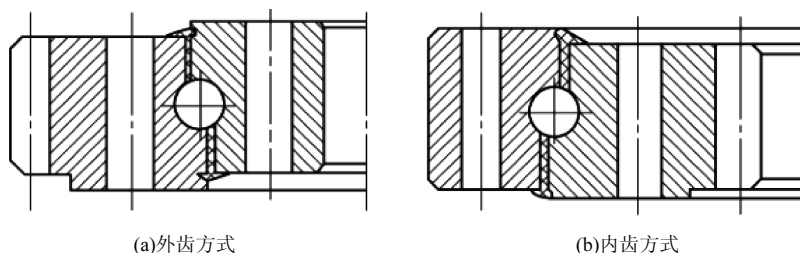


图 7.3 偏航齿圈的结构

## 2. 驱动装置

驱动装置是偏航电控系统对风、解缆的执行机构，它驱动机舱围绕塔筒轴线旋转。要求启动平稳，转速均匀无振动现象。减速装置有时利用行星减速器来完成，有时利用蜗轮杆与行星减速器。驱动装置的组成如图 7.4 所示。

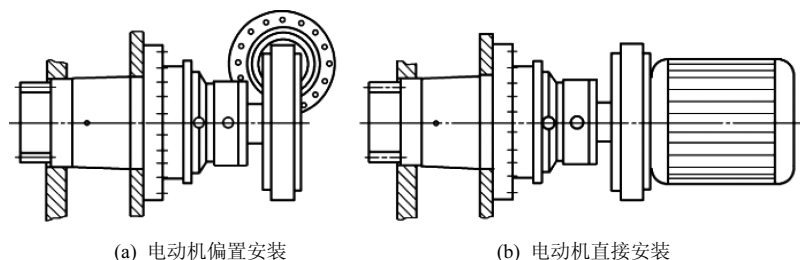


图 7.4 驱动装置的组成

## 3. 偏航制动装置

偏航制动装置是偏航电控系统的重要组成部分，它由制动盘和偏航制动器组成，如图 7.5 所示。制动盘由制动钳体和制动衬块组成。制动钳体一般采用高强度螺栓连接，用经过计算的足够力矩固定于机舱的机架上。

## 4. 偏航计数器

偏航计数器拥有一个齿数为 10 的小齿轮，它与偏航轴承的外齿相互啮合，通过一套传动机构将小齿轮的转动传递到凸轮上，如图 7.6 所示。偏航计数器拥有左偏、右偏开关各一个，每个开关内拥有动断触点、动合触点各一个，其中动断触点与安全链串联，动合触点接入检测回路。当风力发电机组同一方向的偏航角度过大时，凸轮将左（右）偏开关压下，安全链断开，风力发电机组紧急停机；检测回路同时接通，风力发电机组报安全链断故障及左（右）偏开关动作。

## 5. 扭缆保护装置

扭缆保护装置的作用是防止失效保护，即偏航电控系统的偏航动作失败时，电缆的扭绞危机机组安全运行时动作，使机组紧急制动停下。

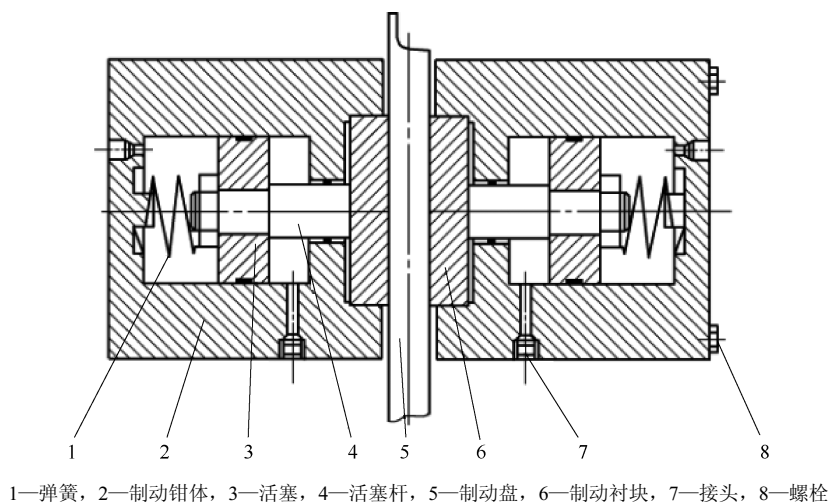


图 7.5 偏航制动装置结构

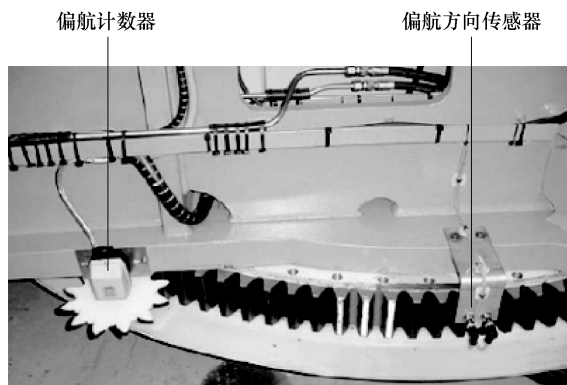


图 7.6 偏航计数器

## 6. 偏航电控系统润滑装置

自动润滑系统通过油脂润滑泵输送到偏航轴承内部及偏航齿轮面，减少手动润滑的不均匀性。

## 7.4 偏航电控系统工作原理

偏航电控系统是一个随动系统，风向仪将采集的信号传送给机舱柜中的可编程逻辑控制器的输入/输出接口，经过程序运算后，与设定值进行对比，通过输出相应的信号来驱动偏航电动机动作，调整机舱对准风力最大的方向，动作完成后进行偏航的制动状态。风力发电机组执行自动解缆动作及其他人为偏航指令时，也会执行偏航动作。

偏航过程中风向标检测机舱与风向的偏差角度，系统的接近开关是用来累加偏航齿数的装置。如果停止偏航或人为停止偏航的要求得到满足，偏航电动机就会断电而停止，偏航的传动机构就会失效，机组停止运行。

(1) 手动偏航。手动偏航需要人为干涉，主要应用在系统调试、检修时。在控制系统

硬件电路中有相对独立的电路。执行手动偏航时，偏航闸一般需要完全释放。在偏航过程中，系统故障信息会影响手动偏航程序的执行，以保护在人为干涉偏航下系统的安全。

(2) 自动对风偏航。在自动对风偏航过程中，偏航电控系统是完全由程序自动控制的，一般偏航液压闸未完全释放，会保持一定的压力。偏航状态随风向的变化而变化。

(3) 解缆偏航。电缆缠绕角度大于电缆缠绕安全角度时，执行解缆偏航程序。在解缆过程中，偏航液压闸一般都在完全释放状态，自动偏航角度一般设为  $360^\circ$ 。

风力发电机组偏航时，驱动电动机得到主控命令进行正方向或反方向旋转。在旋转过程中，偏航角度、方向信息实时由偏航角度、方向传感器进行采集，并将信息回馈到主控系统，主控得到这些信息后，计算并与风向进行比较，当机舱方向在合理的风向偏差范围内时，偏航电控系统将停止偏航。

偏航控制系统框图如图 7.7 所示。

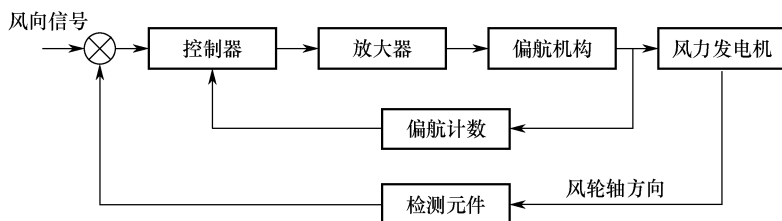


图 7.7 偏航控制系统框图

### 1. 偏航控制系统各机构的动作原理

(1) 风速计。控制器能够记录每秒的风速，每 10 分钟运算程序就可得到风速的平均值，以此来判断此时启动的风速和停机的风速。

(2) 风向标。风向标可以剔除由于测量误差而产生的不准确信号。测量到的风速小于  $3\text{m/s}$  时，偏航电控系统无法启动。

(3) 扭缆开关。可以采取人工对齐的方式来自动消除电缆的缠绕。停止触点移至动态时，风力机能自动解缆，这时发电机不允许进入维护阶段。

(4) 偏航编码器。它不需要记住并找到参考点，也不需要一直计数。需要知道位置时，必须读取它。

(5) 接近开关。检测偏航时经过它的偏航轴承外齿数量，并传送至控制器转换成偏航角度值的变化。

(6) 偏航轴承及偏航刹车。偏航轴承外齿圈与偏航刹车盘固定，并通过螺栓安装在塔架顶端，内齿圈通过螺栓与机舱底板固定在一起。偏航闸也固定在底座上，通过其两侧的闸片夹紧刹车盘（见图 7.8），将机舱位置锁定。

(7) 偏航机构。偏航电动机主回路由偏航断路器、偏航接触器、热继电器和连接电缆组成。主回路是一个正反转控制回路，电控系统通过分别接通左右偏航接触器实现风力发电机组的左右偏航动作。

偏航电动机通电后，电磁刹车释放，电动机转动，偏航减速器将电动机的转动减速，并将动作和扭矩传递给偏航小齿轮，通过偏航小齿轮（见图 7.9）与偏航轴承外齿圈啮合，实现机舱的偏航动作。



图 7.8 偏航刹车闸



图 7.9 偏航小齿轮

下面以国内某厂生产的 1.5MW 风力发电机组为例进行介绍。该机组的偏航机构是由偏航电动机、偏航减速器（见图 7.10）、机舱位置传感器、偏航加脂器（见图 7.11）、毛毡齿润滑器、偏航轴承、偏航刹车闸、偏航刹车盘和 3 台电动机驱动的齿轮传动机构组成的。



图 7.10 偏航电动机和偏航减速器



图 7.11 偏航加脂器

通常偏航驱动所用的电动机的极数较多，额定电压一般是 400V，定子三相绕组的接线方式为星形连接。电动机机轴末端装有一个电磁刹车装置，当偏航停止时将电动机锁住，目的闭锁偏航传动装置。使用电磁刹车手动释放装置时，要把手柄抬起来才能释放刹车。

偏航刹车闸通常为液压盘式结构，来自液压系统的 140~160bar ( $1\text{bar} = 10^5\text{Pa}$ ) 压力使得刹车盘被刹车片抱紧，形成制动力。偏航运行，液压完全释放，仍能保持 24bar 的剩余压力。偏航控制过程中，提供必要的阻力力矩，能够有效减小风机运行中的机械振动。

偏航制动盘是一个固定在偏航轴承上的环。偏航减速器是一种行星齿轮箱，可将高速、低扭矩动能从偏航电动机转换为低速、高扭矩动能。凸轮计数器是一个 10kΩ 回路电阻。风机通过电阻的变化，确定风机的偏航角度并计算偏航的速度。

偏航加脂器用于润滑偏航轴承并对其加脂，毛毡齿润滑器负责润滑偏航齿。

## 2. 指令说明

偏航电控设备能够按照预先设定的动作进行偏航操作。除上文提到的自动对风偏航、

自动解缆外，还有自动偏航侧风、控制板操作手动偏航、机舱左右偏航开关偏航等指令操作。要防止手动偏航形成的机组扭缆现象，应该预设手动偏航限定运行时限，超过该值时，风力发电系统自动停止偏航。

通过机舱左右偏航开关偏航时，必须 24 小时有人值班，避免风机组一直偏航导致左右偏按钮动作，致使用于安全保护的链条破裂。

指令操作的优先级别由高到低依次是机舱左右偏航按钮动作、控制屏按钮偏航操作、中控远程操作、侧风、解缆、自动对风<sup>[34-36]</sup>。

## 7.5 自动偏航控制过程分析

偏航电控系统的控制过程主要分为以下几部分：90°的侧风控制操作、自动解缆操作、人工解缆操作和自动偏航操作等，其主流程图如图 7.12 所示。

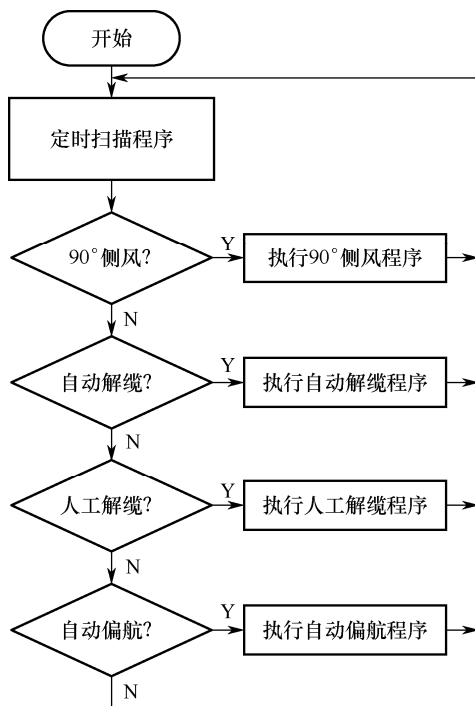


图 7.12 偏航电控系统控制过程的主流程图

依据风向标进行控制的自动偏航控制，是通过风向传感器测量得到的风向信号，由相应控制器（如 PLC）来辨别偏航的状态，从而发出相应的偏航控制信号。由于风向具有不确定性，所以在一定的偏航误差范围内允许偏航控制电动机不动作，避免频繁启停风力机最终导致其发生故障和寿命降低。自动偏航利用风向传感器的位指令 ASS 来进行判断。具体过程叙述如下。

自动偏航风向传感器位指令 ASS 的状态如图 7.13 所示。

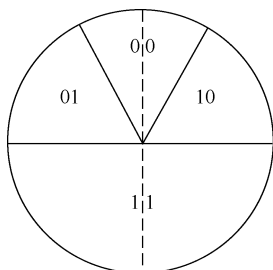


图 7.13 自动偏航时风向传感器位指令 ASS 的状态（虚线表示风向标 0° 位置）

来自自动偏航风向标传感器的 ASS 指令传达偏航控制操作。检测到 ASS 的数值为 00 时，代表机舱目前正好位于对风的状态，这时偏航控制不起作用。检测到 ASS 的数值为 11 时，表明此时应该采取钝角偏航动作，防止电缆缠绕的发生，采集上次钝角方向的逻辑结果，然后将其取逻辑反，最后输入本次偏航的方向。检测到的 ASS 数值为 01 时，代表当前应该进行锐角操作，这时电动机应该正向旋转；检测到 ASS 的数值为 10 时，表明当前应该进行锐角偏航操作，此时电动机对应反方向旋转。偏航风力机正常启动后，偏航计数装置开始计数，偏航电动机工作一段时间后，检测 ASS 的值是否为 00，如果 ASS 的数值为 00，代表机舱已经与风轮正对，否则判断检测计时时间是否大于偏转 360° 时达到的时间，如果判断成立，且偏航电动机仍在运行，就终止偏航调节，马上向控制器返回安全停机和风向标故障信息。此时，若 ASS 的数值为 00，则向控制器传出自动偏航结束并复位。以上控制流程如图 7.14 所示。

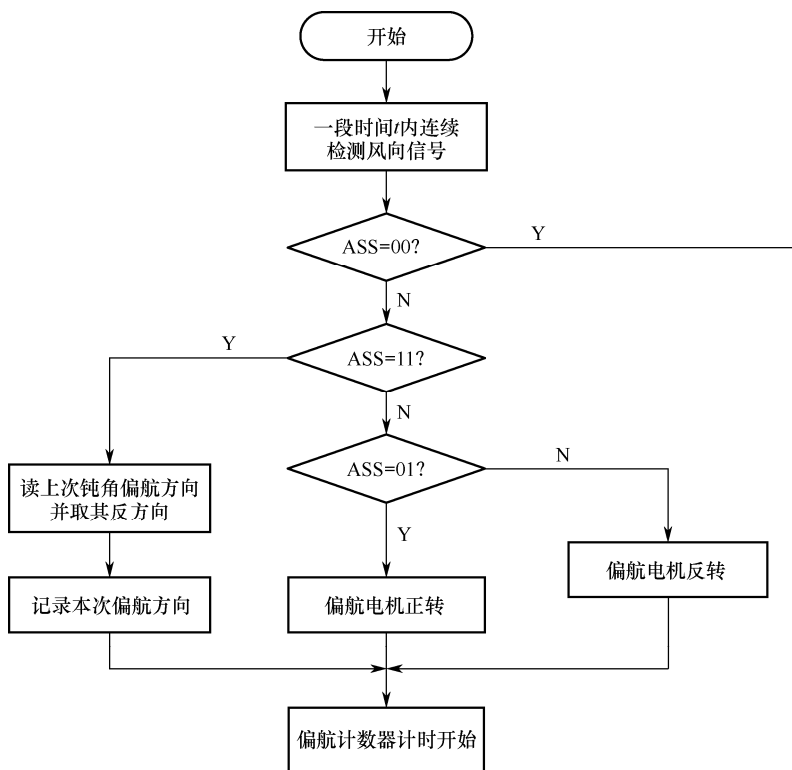


图 7.14 自动偏航控制程序流程图

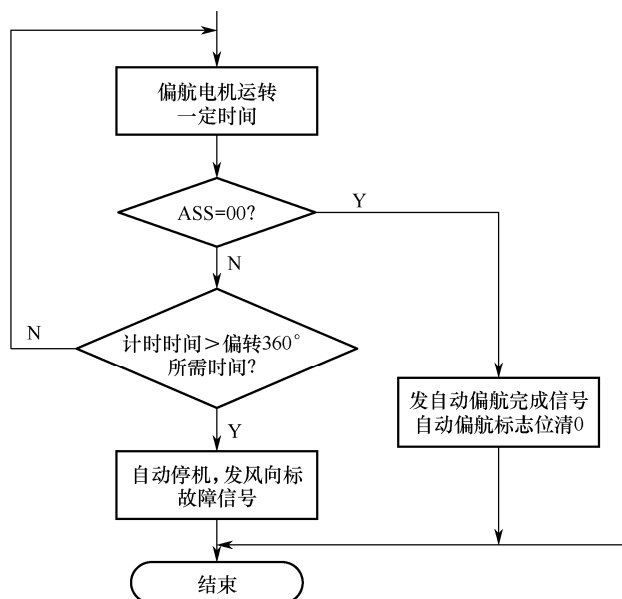


图 7.14 自动偏航控制程序流程图（续）

相关参数的数值和电动机的停止及运行状态如表 7.2 所示。

表 7.2 自动偏航传感器 ASS 参数的具体说明

ASS 数值	设置操作	电动机运转
00	对准风向	不运行
01	锐角控制	电机正转
10	锐角控制	电机反转
11	钝角控制	视上次偏航而定

### 1. 90°侧风控制

遇到特大强风时，为了机组的安全，控制系统需要具有自动屏蔽偏航指令的功能，以便转而执行对机舱进行 90°侧风控制的程序。

控制过程如下：通过采集 90°侧风风向标传感器 DSS 传来的状态数值，判定需要的下一步动作，DSS 的数值为 00 时，代表风机系统机舱位于 90°侧风方向；此时需要进一步检测 DSS 的当前数值是否为 10，如果 DSS 的当前数值是 10，为了实现机舱的动作最快，驱动电动机就应该反方向运行；如果当前 DSS 的数值不是 10 而是 11，驱动电动机就应该正方向运行；这时应让计时器进行计数。偏航电动机继续转动一个阶段，然后继续检测 DSS 的当前值是否为 00，如果检测到 DSS 的值为 00，代表机舱正在进行 90°侧风操作，如果检测到 DSS 的值不为 00，就检测计时时间和偏转 360°所需时间的大小关系，如果前者大于后者，那么电动机保持运行，同时给中心控制器返回停机和风向传感器故障数据。当采集到的 DSS 不等于 00，偏航时间小于等于偏转 360°所需时间时，电动机仍运转，直到 DSS 状态为 00 时止，此时向中心控制器发出 90°侧风完成信号，复位相应标志。偏航电控系统 90°侧风程序流程如图 7.15 所示。



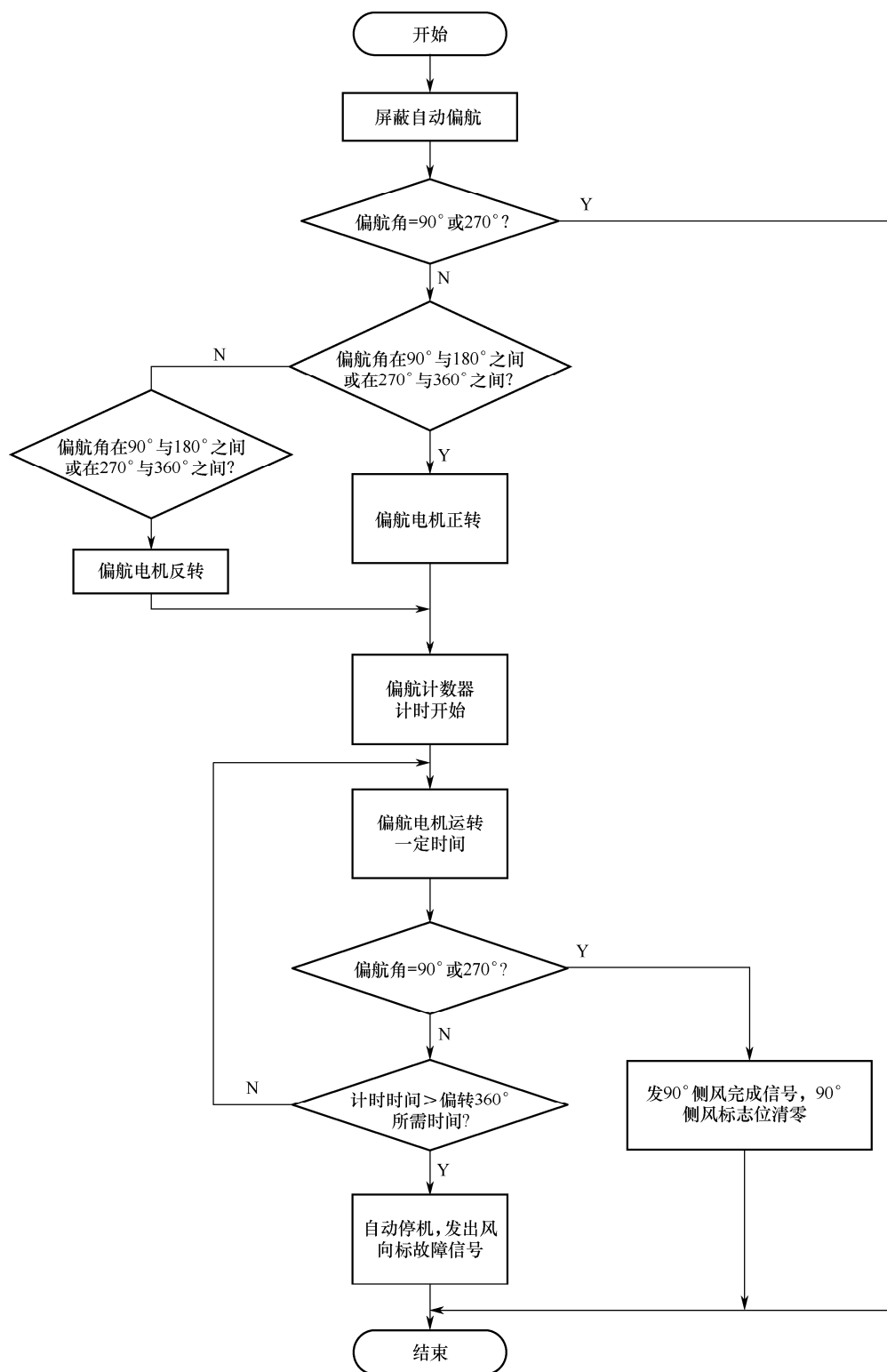


图 7.15 偏航电控系统 90°侧风程序流程图

## 2. 人工偏航操作

在偏航控制的信息采集阶段，主要搜集人工偏航启动或停止输入的信号。若当前检测到有人为偏航信息的输入，就立即辨认当前是否正在执行当前操作。如果满足判断的条件，系统控制器就会停止当前的自动偏航操作，并复位相应标记，再次检测人工偏航方向的输入信号，检测偏航方向与最后的人工偏航方向是否相同。如果相同，就释放当前控制，此时可以利用手动控制，否则断开驱动电动机，朝相反方向行驶，并记录转向。等到能够检测到信号时，切断驱动电动机的供电电源，使其停运。

人工偏航程序流程如图 7.16 所示。

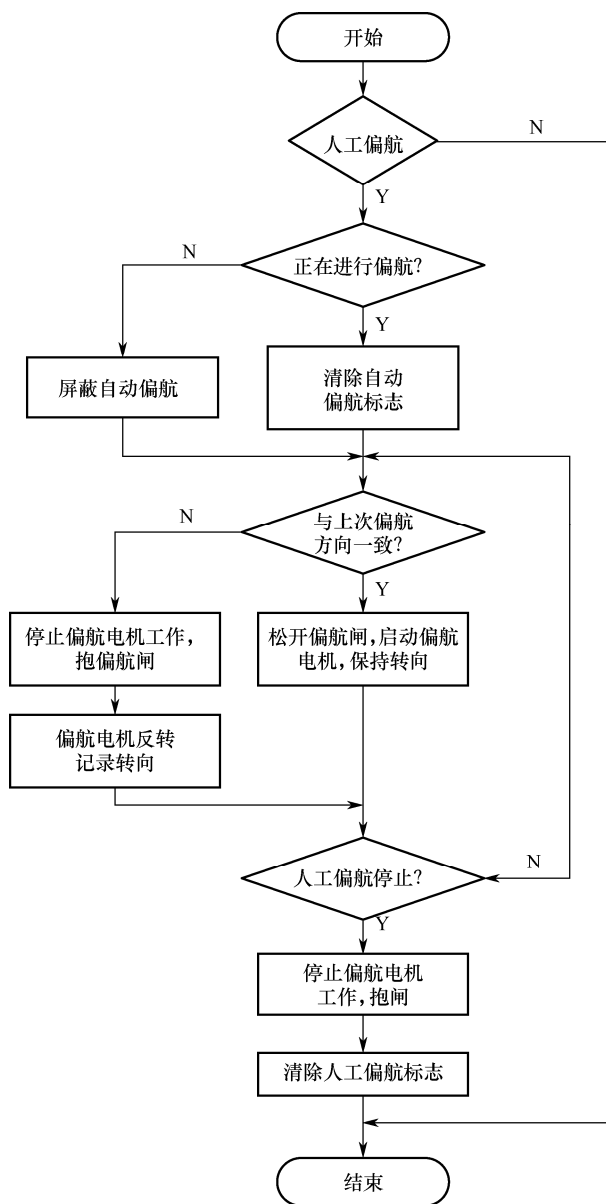


图 7.16 人工偏航程序流程图

### 3. 自动方式进行解缆操作

风力发电系统中偏航机构的供电电缆在运行过程中, 高速机械旋转运动很容易使其扭曲而变形。出现这种情况时, 必须立即按照系统的设置采取相应的措施进行处理, 使发生扭曲变形的电缆恢复原状, 即对其进行解缆操作。按照风力机的不同型号, 解缆操作时, 对于不同结构的绕组的数量, 其相应的设定值会有所不同。当检测装置即计数器的测量值达到系统动作的设定值时, 偏航系统即刻实施解缆操作。这时, 为了将扭曲的电缆恢复到原来的自然状态, 偏航驱动电动机必须进行反方向旋转, 只有这样才能把扭曲的电缆解缆。

凸轮解缆利用采集到的角度传感器 CW 和 CCW 的偏转角的具体测量值, 判断是否采取相应的解缆动作。第一步是将锁紧装置释放, 目的是不让传感器发出报警信号, 当检测到的 CW 的当前值是 1 时, 驱动电动机进入正向旋转状态, 如果此时检测到的 CCW 的当前值是 0, 那么驱动电动机就会反向运转。期间连续检测偏航中心传感器信号, 保持检测到的值是 0 时, 就会停止解缆操作, 这时驱动电动机就会在惯性的作用下最终停止, 并随时准备再次启动, 同时向中心控制器反馈自动解缆已经完成的信号。

偏航电控系统的自动解缆程序如图 7.17 所示。

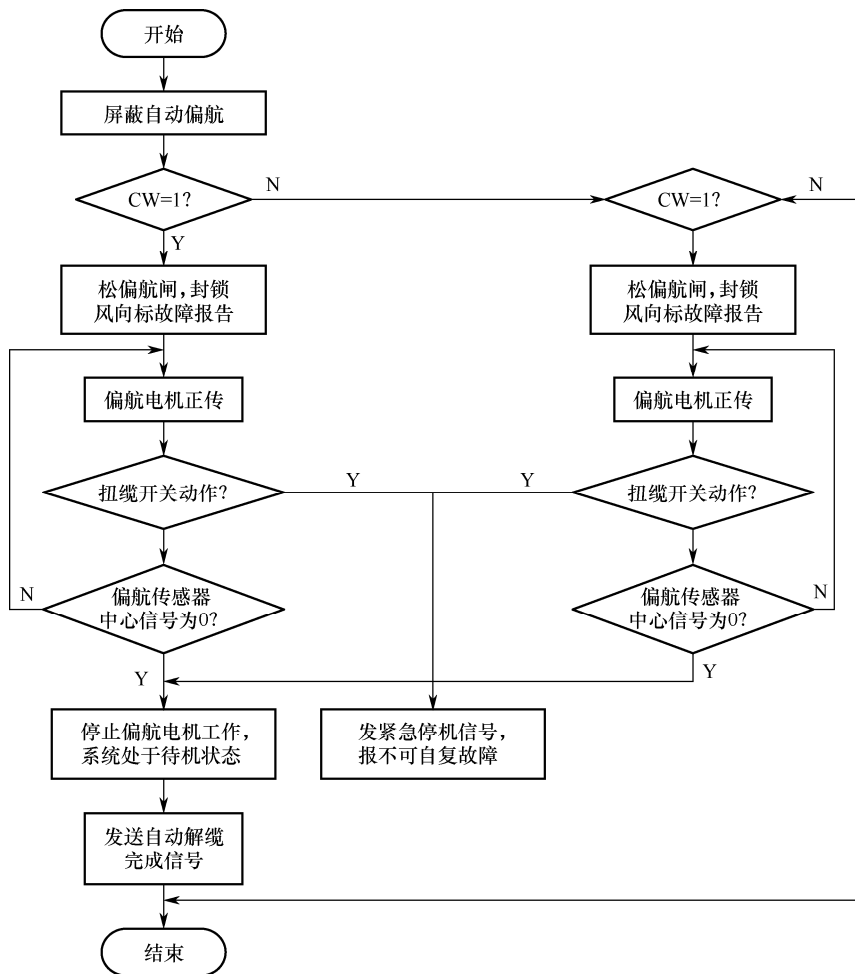


图 7.17 自动解缆程序

#### 4. 阻尼刹车操作

阻尼制动的过程就是当风力涡轮机检测到偏航信号时,制动操作随即投入运行。通过采集风速、风向和测控速度的信息,经过运算后决定反向制动力矩的大小。然后通过调节制动力矩的大小来改变比例阀的开度,最终调节液压流量和液压压力的数值。制动力矩的大小可以表明阻尼力矩增大或减小的趋势。

## 7.6 偏航电控系统的维护和保养

### 1. 偏航制动装置

#### (1) 日常巡视和故障处理

①每班巡视并记录液压制动部件的工作压力,如果出现异常,首先找出异常的原因,然后排除故障。

②每月检查制动片的磨损情况和裂纹,主要检查制动片的厚度是否满足要求,如出现异常,要及时更换合格的刹车片。

#### (2) 相关的测试要求

①使用专用仪器测量制动器壳体和制动摩擦片的厚度,观察其形变的程度,如果不满足要求,那么必须立即更换。

②制动器摩擦片的保养和维护。

③检查油箱各侧面是否渗漏。

④摩擦片的最小厚度不足 2mm 时,及时更换新的同型号摩擦片。

⑤检查制动器固定的螺栓紧固程度,如有松动,要当场拧紧。

### 2. 轴承维护

偏航轴承支撑机舱自重和偏航动载荷,因此必须重视对其的日常维护。常规的维护任务一方面是保持滚道润滑油脂的正常润滑效果,另一方面是偏航齿表面润滑的维护。

(1) 偏航轴承内圈和外圈上安装有很多注油嘴,要按照规定的周期采用油枪注入润滑脂来保持润滑效果,注入新油脂的同时必须把旧油脂从排油嘴排出,这样才能保证换油脂后的效果。

(2) 偏航齿面也应该按照维护操作的规定,定期喷涂或使用润滑脂进行润滑操作,如果机组停放时间过长,那么更要注意对齿面做好润滑和防锈蚀保养。

(3) 目前商用的风力发电系统都采用自动润滑,因此定期检测并更换油箱中的机油对系统的可靠、稳定运行至关重要。

(4) 观察轮齿啮合的完整度。

(5) 保证齿轮侧隙大小合适。

(6) 检查噪声和振动是否过大。

(7) 检查连接螺栓紧固程度是否合适。

(8) 系统密封性能至少每年检查一次。系统正常工作状态下,若出现密封装置性能不良的现象,则应该及时要求生产厂家处理。禁止溶剂和密封带接触,密封带禁止涂漆。每检查一次轨道系统磨损现象,都要对磨损状况进行测量,必要时可联系厂家实地处理。

### 3. 偏航电动机

(1) 每次例行检查时, 均应使用纱布、汽油仔细清洁偏航电动机, 以方便检查漏油、防腐脱落情况。

(2) 检查偏航电动机电缆有无破损或绝缘损坏现象出现, 如有则立即更换并进一步测量偏航电动机绕组的绝缘性能。

(3) 在机舱内手动检查偏航电动机运行时有无不正常的机械和电气噪声, 如有则必须立即对偏航电动机做认真检查。

### 4. 偏航减速装置

(1) 按规定的频度进行相关部件的检查, 查看时采用棉纱布和汽油进行擦拭, 然后对偏航减速装置全面清洗, 清洗后可以比较容易发现是否存在漏油和锈蚀状况。检查完毕应该恢复装置表面的润滑。

(2) 检查的重点内容包括偏航减速装置的油箱的油位是否过低, 如果油位过低, 应立即补加合格油到正常油位。

(3) 偏航减速装置存储的润滑油的外观检查包括油的外观颜色, 发现油的颜色变化较大或可能含有大量水分等杂质时, 必须立即清空油箱后注入合格的新油。

(4) 偏航运行时, 检测偏航减速装置是否发出异常响声, 如果出现此种状况, 应该对偏航减速装置进行全面排查。

(5) 偏航减速装置表面防腐层是否完好, 若出现少量脱落现象, 必须马上进行二次防腐修护。

(6) 定期使用经过校准的工具, 使用规定的力矩值紧固偏航减速装置与机舱底座的连接螺栓。

### 5. 偏航齿轮表面

(1) 偏航齿轮表面按时采取润滑剂进行喷涂, 防止锈蚀和减小摩擦损耗。

(2) 如果齿轮面出现裂纹或破损, 那么应仔细检查并判断, 然后决定是暂时维护还是进行更换。

### 6. 传感器的维修和保养

风向传感器主要由风速仪和风向标构成。投入使用后, 其维修量较小, 但在常规巡查时必须注意以下几个方面:

(1) 巡视避雷针的支架稳固性。

(2) 巡视风速仪和风向标的振动幅度与外观的完好性。

(3) 观察风速仪的风杯及风向标旋转是否正常无卡阻。

(4) 检查各部分的连接线有无松动和绝缘老化现象。

(5) 调整风向标标记点使其始终处于正对机头的方向。

还可依据风力发电机系统整体的运行状态或故障情况, 来确定风传感器运行正常与否。

(1) 风力发电系统机头运行方向和主风向之间的偏斜角度过大时, 需要检测和调整风向标标记点是否正对机头。通常, 这种情况会导致风力发电系统出现捕获的风速大但输出功率小的低效运行状态。

(2) 机电系统运行过程中, 如果存在某台风力发电机捕获的风速显著小于周围机组的

现象,那么就有必要查看风向标是否被卡阻或风向标是否损坏。通常,这种情况也会导致风力发电系统出现捕获的风速大但输出功率小的低效运行状态。

(3) 风力发电系统的报警装置发出风速仪故障或风向标故障信号时,必须立即对风传感器进行查看,排除误报警。

### 7. 偏航极限位置开关的巡视和保养

(1) 偏航极限位置开关通常故障率低,维修次数少。在进行日常检查时,要注意观察固定支架的牢固程度,必要时大致测量两侧极限位置开关之间的距离是否合格。

(2) 通常要求两个极限位置开关的反馈信号变化同步,它们的状态信号能够显示在控制中心的监控显示屏上。因为只有这样,才会及时发现偏航极限位置开关的故障。维护人员可以通过控制界面发现故障,从而及时维修或更换。

### 8. 偏航计数器的维护和保养

(1) 计数器用来检测偏航圈数和扭缆设备,因此其调整值应该准确无误,否则可能会发生检测到的偏航圈数不正确,导致扭缆信号失灵,出现危及系统正常运行的各类事故。

(2) 如果由于某种原因机舱处于扭缆停机状态,那么此时就必须从系统中将偏航计数器取出,利用手动方式进行解缆操作,直至顺缆状态为止。松动螺栓,打开计数器顶端的密封盖板,利用旋转小齿轮来使凸轮回位到中间位置,也可以调整凸轮上的调节螺丝,将凸轮调节到合适位置,再把校正好的偏航计数器重新安装到相应的位置,而且必须在控制系统中将偏航角度的数值清零,这样才可以恢复偏航计数器,使其进入正常工作模式。

# 第 8 章 基于 PLC 的风力发电系统偏航程序设计

## 8.1 PLC 介绍

美国数字设备公司（DEC）在 1969 年首次发明了可编程序逻辑控制器（Programmable Logic Controller, PLC），并在通用汽车公司成功应用。至此，可编程序逻辑控制器技术在世界范围内的各种工业中得到了广泛应用。它与工业机器人、CAD/CAM 技术并列为现代工业技术的三大支柱。

像其他技术一样，可编程序控制器技术不断更新和发展，但直到如今它都没有公认的定义。权威机构国际电工委员会（IEC）给出的 PLC 定义为：可编程序逻辑控制器是一种专门用于数字运算操作的控制器，可用于典型的工业生产线上，它通过可编程序控制器的内存，使用 PLC 在内存中的各种指令运算，并通过 I/O 模块操纵不同的机构进行生产，达到全自动化的目的。

PLC 的突出特点为：可靠性高、抗干扰能力强；编程简单、使用方便；设计、安装容易，维护工作量少；功能完善、功用性强；体积小、能耗低；性能价格比高。

### 8.1.1 PLC 的基本组成

PLC 结构类似于普通的计算机，主要由进行系统总体控制的中央处理器（CPU）、进行程序存储的存储器（RAM 和 ROM）、I/O 模块电路、内部供电单元、I/O 扩展模块等组成。PLC 通信传输采用总线结构来采集输入数据和发出控制指令。PLC 的基本组成如图 8.1 所示。

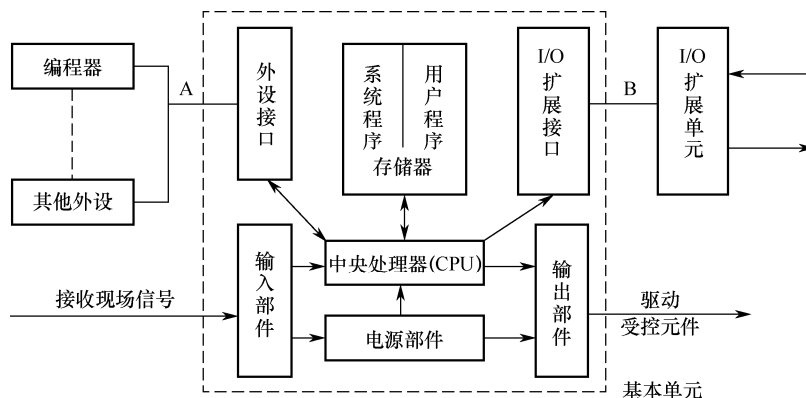


图 8.1 PLC 的基本组成

#### 1. 中央处理器（CPU）

中央处理器是 PLC 的指挥中心，负责整个逻辑运算和数据的传送。它通过总线与存储器和各种接口连接，以控制它们有条不紊地工作。PLC 通用的 CPU 类型有通用的微处理器、单片机式和双极型位片式三种。

## 2. 存储器

存储器用来放置用户编写的程序和逻辑运算的中间数据。ROM（只读存储器）不可改写，RAM（随机存储器）可以存放临时程序并改写。通常生产厂家会将系统程序存入ROM。用户编写的实用程序或一些中间数据可以暂时存放在RAM中。

## 3. I/O 模块

输入/输出模块简称 I/O 模块，其作用是将 PLC 内部的运算结果和外围设备进行信息互换。I/O 扩展接口可让 PLC 的执行指令速度加快。

### 8.1.2 PLC 的工作原理

PLC 的中央处理器依次检测并执行用户编写的程序的循环称为循环扫描，它分为输入采样阶段、程序执行阶段和改写输出阶段。PLC 在程序执行阶段反复地循环扫描。PLC 的工作原理如图 8.2 所示。

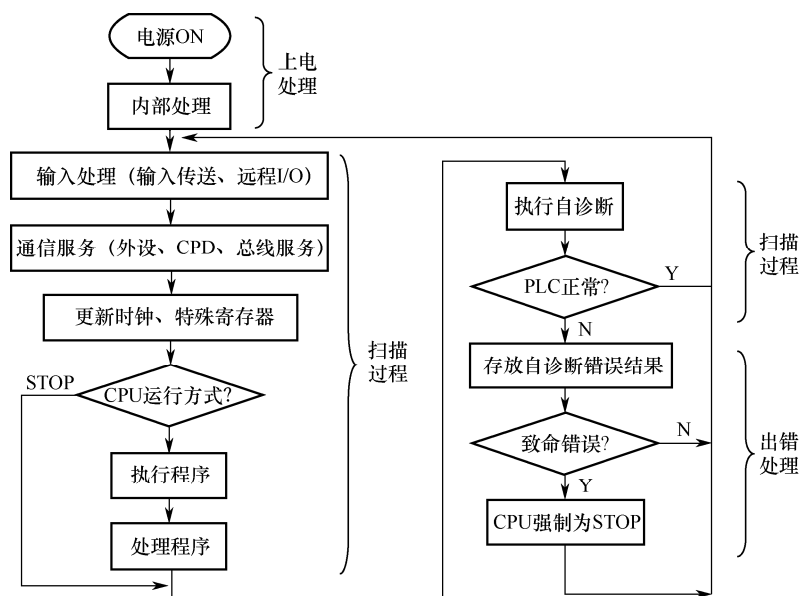


图 8.2 PLC 的工作原理

（1）输入采样阶段。在这一阶段，PLC 周而复始地循环扫描来自外部的输入信息，把采集到的数据暂时存放在 I/O 映射区域的某些单元里。此阶段完成后，采集到的数据信息在用户程序执行和输出刷新阶段会被调用。输入采样结束后，输入端口的数据就只能暂存，而不再被写入下两个阶段。

（2）程序执行阶段。在这一阶段，PLC 一直按照从上到下、从左到右的顺序来执行用户编写的程序。然后根据逻辑的结果操作，刷新系统 RAM 中相应位状态的逻辑线圈，或刷新相应状态下 I/O 映像区域的输出线圈，或确定是否执行所需的特殊命令。也就是说，在用户程序执行过程中，只有映像数据的 I/O 区域中的入口点和状态不会改变，并且 I/O 映像区域或 RAM 系统中的其他输出点和软设备存储区域与数据都可能发生变化，而且排在梯形图的顶部，程序执行结果下面的梯形图通常用于线圈或数据。相反，底部的梯形图或状态数



据只能将逻辑线圈刷新到下一个扫描周期，以便作用于上述过程的顶部。

(3) 改写输出阶段。用户程序执行完毕，PLC 随即进行输出刷新。此时，PLC 中央处理器通过 I/O 映射模块中的逻辑值并输出数据，最后通过继电器控制负载。它是 PLC 控制器的实际输出。相同数量的梯形图具有不同的排列顺序，因此会导致不同的执行。另外，与继电器控制装置的硬件逻辑并行运行扫描用户程序的结果是不同的。当然，如果扫描周期在整个运行过程中可忽略不计，那么两者之间没有区别。图 8.3 显示了 PLC 的等效电路。

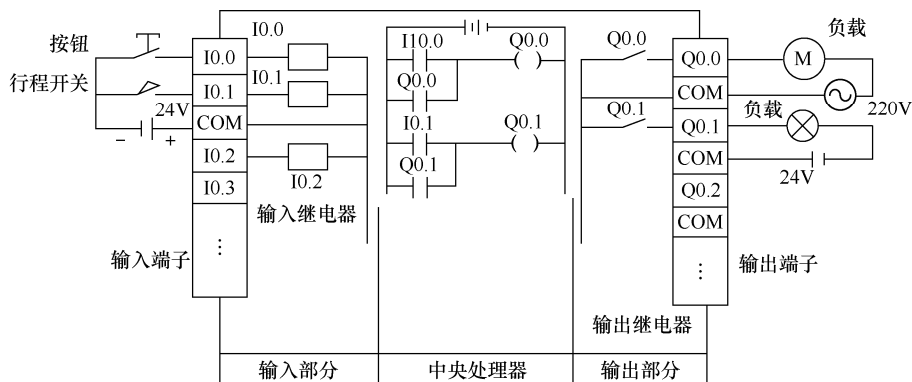


图 8.3 PLC 的等效电路

## 8.2 PLC 的选型

就硬件选购而言，目前市场上的 PLC 产品类型众多，除国内知名品牌外，国外有更多的知名品牌，如日本的欧姆龙、东芝、富士，德国的西门子及韩国的 LG 等。近年来，PLC 产品的价格大幅下降，性价比越来越高，因此成了技术人员首选 PLC 的重要原因。

(1) 确定系统的大小。首先，要考虑的系统必须由一个 PLC 控制，或者选择一个 PLC 来组成一个网络。然后计算 PLC 的输入/输出点数。一定要考虑留出一定的裕度（通常为额定点数的 10%）。

(2) 确定系统中的负载类型。首先按照 PLC 的输出确定负载类型是直流型还是交流型，是大电流型还是小电流型。不同类型的负载应使用不同类型的输出，因此它对运行系统的稳定性起着重要作用。

(3) 在 PLC 中要求存储容量和速度。虽然其他国家生产的 PLC 产品的原理大体相同，但也存在一定的差异。迄今为止，我们还没有发现世界上各公司生产的产品是完全兼容的。此外，国内外公司开发的软件也不尽相同，但用户程序的存储容量和指令的执行速度被排除在外，因为它们是两个重要的指标。一般来说，PLC 的存储容量越大，运行速度越快，价格相应也越高。但在选择 PLC 时，还要考虑系统需求的大小和其他因素。

因此，选用 PLC 产品时，应考虑系统的实用性和经济等因素。

### 8.2.1 德国西门子公司生产的 S7-200 PLC 及特点

目前国内外众多厂商已经生产出各种功能不同的 PLC 产品。用户在选择所需 PLC 的结构形式时，主要参考的性能指标包括输入/输出点、存储容量、I/O 响应时间、价格和制造商

的信誉度等。以下着重介绍德国西门子公司生产的 S7-200 PLC。

西门子 S7-200 PLC 的优点如下：

(1) A/D 和 D/A 转换的高精度和高转换速度。A/D 和 D/A 分别称为模数转换和数模转换。具有 3 路 A/D, 1 路 D/A, A/D 和 D/A 转换速度的模拟量模块为  $125\mu\text{s}$ , 能够保证系统的采样, 控制精度和速度满足一般的工业生产要求。

(2) CPU 运算速度快, 约为  $0.37\mu\text{s}/\text{bits}$ , 具有 PWM 脉冲输出等功能。存储容量足够大, 可以完全适应现代控制技术。

(3) 输入/输出点的数量多并且响应快。24 路输入/16 路输出, 每个点可设置滤波器参数, 4 个 20kHz 高速计数器, 2 个高速输出端口, 适合实时控制要求。

(4) 通信网络的通信能力强。具有 2 个 232/485 通信端口, 可方便地连接 232/485/422 等通信接口, 以满足监控系统的要求。

(5) 高可靠性的 CPU 模块, 输入/输出 (I/O) 模块, 通信模块高度集成, 结构简单, 使用方便。事实证明 S7-200 PLC 完全满足控制系统的要求, 具有较好的性能。

图 8.4 和图 8.5 分别为 S7-200 PLC 的示意图和实物图, 图 8.6 为 S7-200 PLC 内部 CPU 的接线图。

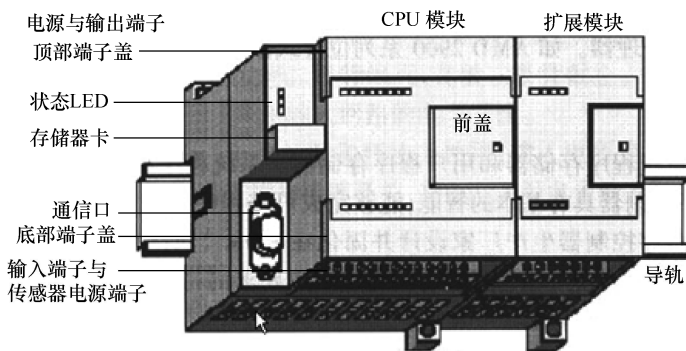


图 8.4 西门子 S7-200 PLC 示意图



图 8.5 西门子 S7-200 PLC 实物图

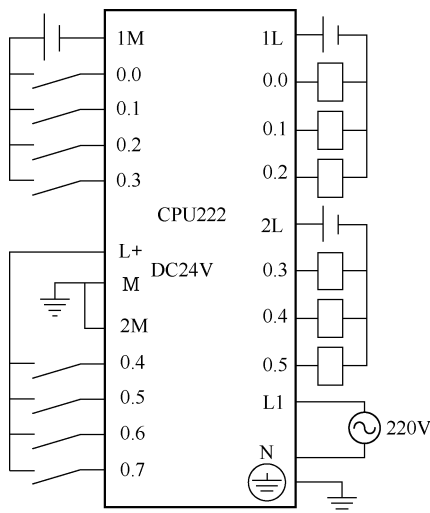


图 8.6 S7-200 PLC 内部 CPU 的接线图

## 8.2.2 PLC 技术参数

西门子公司 S7 系列 PLC 分为 S7-400 大型 PLC、S7-300 中型 PLC 和 S7-200 小型 PLC 几种。S7-200 系列 PLC 包括 CPU 21x 系列和 CPU 22x 系列，常见的有 CPU 221、CPU 222、CPU 224 和 CPU 226。数据格式和取值范围如表 8.1 所示。

表 8.1 数据格式和取值范围

寻址格式	数据长度（二进制位）	数据类型	取值范围
BOOL（位）	1（位）	布尔数	真（1），假（0）
BYTE（字节）	8（字节）	无符号整数	0~255，0~FF（H）
INT（整数）	16（字）	有符号整数	-32768~32767，8000~7FFF（H）
WORD（字）		无符号整数	0~65535，0~FFFF（H）
DINT（双整数）		有符号整数	-2147483648~2147483647 8000 0000~7FFF FFFF（H）
DWORD（双字）	32（双字）	无符号整数	0~4294967295 0~FFFF FFFF（H）
REAL（实数）		IEEE 32 位 单精度浮点数	-3.402823E+38~-1.175495E-38（负数） +1.175495E-38~+3.402823E+38（正数）
ASCII	8（字节）/个	字符列表	ASCII 字符
STRING（字符串）		字符串	1~254 个 ASCII 字符

（1）24V 电源模块。CPU 221 和 CPU 222 可以输出的电流大小为 180mA。CPU 224 能够输出的电流大小为 280mA，CPU 226 能够输出的电流大小为 400mA。

（2）高速脉冲输出。能够完成 2 个高速脉冲输出，脉冲频率高达 20kHz 左右，因此能够实现步进电机的精确位置控制。

（3）信息端口。CPU 226 有两个 RS-485 接口，能够进行点对点通信和多点通信。

（4）模拟电位器。PLC 22x 系列设置了模拟电位器。模拟电位器可以改写 SMB28 和 SMB29 中的数据，在程序运行时改变参数，如计时器、计数器、预设值的控制参数。

（5）中断输入允许快速响应进程信号的上升缘。

（6）EEPROM 模块。它可以作为一种快速工具来修改和复制程序，而不需要程序员和支持软件存档。

（7）用户数据（如数据块、定时器、计数器的数据）大约能够存储 5 天。备用电池模块的使用可将存储时间延长至 200 天。

（8）CPU 221~226 各有两种不同的电源电压和控制电压。

（9）I/O 点。CPU 221 有 6 个 I 点和 4 个 O 点；CPU 222 有 8 个 I 点和 6 个 O 点；CPU 224 有 14 个 I 点和 10 个 O 点。

（10）高速计数器。CPU 22x 系列有 6 个 30kHz 的高速计数器，能够尽快得到输入/输出信号。

CPU 224 的 I/O 模块、中央处理器、电源结构是整体式的。系统容量不够时，可以添加即插即用的相应模块。图 8.7 显示了 CPU 224 的外部电路接线图。

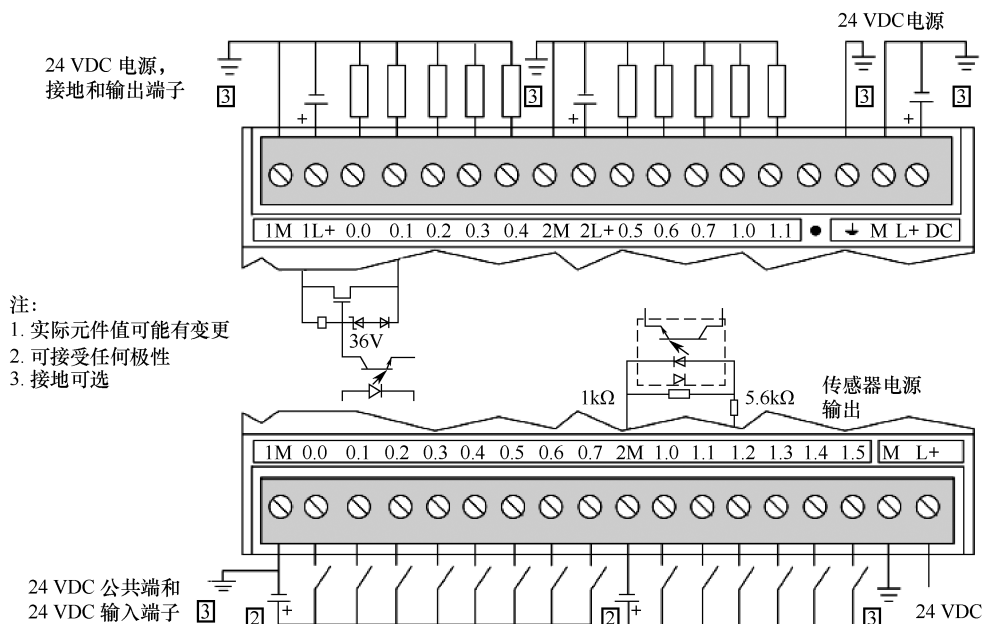


图 8.7 CPU 224 的外部电路接线图

信号输入端隔离干扰，使用双向的光耦隔离，24V 直流电源，1M 和 2M 接线的公共端口。1L 和 2L 是输出端口。

## 2. CPU 224 PLC 的输入/输出端口图

(1) CPU 224 PLC 的基本输入端口如图 8.8 所示。



图 8.8 基本输入端口

(2) CPU 224 PLC 的基本输出端口如图 8.9 所示。

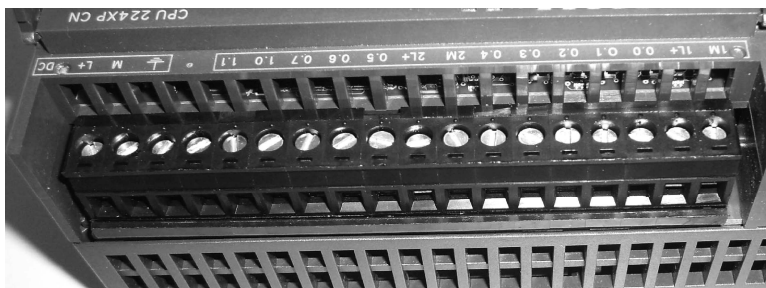


图 8.9 基本输出端口

## 8.3 中央处理器的工作方式

### 1. 工作方式

如图 8.10 所示, CPU 前端的 LED 表明目前的工作方式, 绿灯亮说明处于运行状态, 红灯亮说明处于停止状态, SF 灯亮说明系统出现故障。

(1) STOP (PLC 处在停止阶段)。

(2) RUN (PLC 处在运行阶段)。

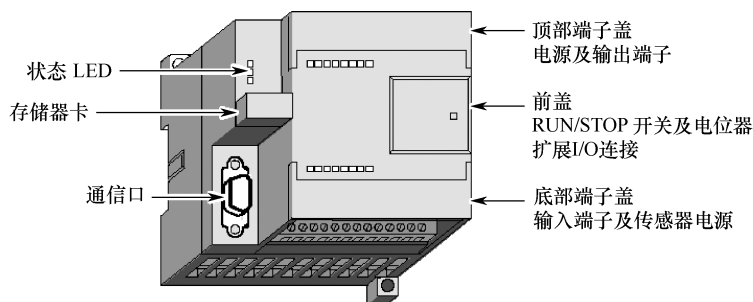


图 8.10 PLC 示意图

### 2. 改变工作状态

(1) 工作状态挡位。工作状态挡位有 3 个: STOP、TERM 和 RUN。挡位处在 STOP 时, PLC 停止运行。挡位处在 RUN 时, CPU 正常工作。模式开关处于停止或 TERM 状态时, 电源一旦接通, CPU 即可停止操作。设置为 RUN 运行时, 中央处理器在电源接通后即刻运转。

(2) 编程软件。人为将模式按钮拨到 TERM 挡位时, 可在 STEP 7-Micro/WIN32 软件中调整运行方式的挡位。

(3) 编写程序指令。用户可以在编写程序时, 人为添加一条 STOP 指令, 中央处理器能够从运行状态变为停止状态。

## 8.4 扩展模块

### 8.4.1 扩展模块简介

#### 1. 扩展单元

扩展单元中通常无中央处理器, 是人为对输入/输出点数的补充。独立用无意义。小型 PLC 的扩展模块有数字量、模拟量、热电偶和热电阻 4 种常见的类型。

#### 2. 电源模块

外界可以为 PLC 通电, 分为 24V 直流、220V 交流两种情况。

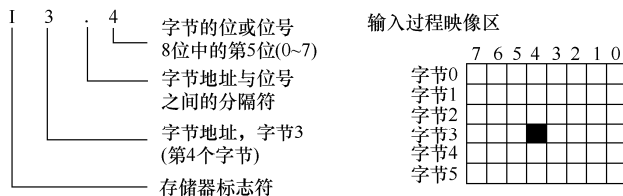
(1) 扩展模块需要 5V 直流电, 内部电源不能提供时应去除某些扩展模块。

(2) 正 24V 直流电源的容量不够用时, 应该另外添加 24V 直流电源。

## 8.4.2 S7-200 PLC 内部触点和数据概述

### 1. 长度

在 S7-200 PLC 中, 存储器单元可以通过位、字节、字和双字寻址。最基本的存储单元是 bit (位), 8 位二进制数组是 1Byte (字节), 其中第零位是最低位 (LSB), 最高位是 MSB。计算机中通常由两个字节组成一个字, 两个字组成一个双字。在寻址时, 数据地址以代表存储区类型的字母开始, 然后是标记数据长度, 最后是存储单元号。对于二进制地址寻址, 它还需要在小数分隔符后进行定位。图 8.11 是一个位寻址的例子, 图 8.12 给出了一个字节寻址的例子。



注: I 表示存储器是输入过程映像区

图 8.11 位寻址示例

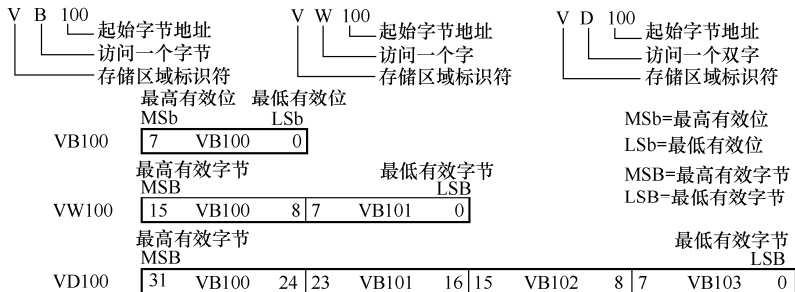


图 8.12 字节寻址示例

### 2. S7-200 遵循“高地址、低字节”的规律

如果将 16#AB (十六进制立即数) 送入 VB100, 16#CD 送入 VB101, 那么 VW100 的值将是 16 位 ABCD, 即 VB101 作为高地址字节, 保存数据的低字节部分。

### 3. 数据类型和范围

小型 PLC 的数据类型一般分为字符串型、0 型或 1 型、整数型和实数型。浮点数是 32 位单精度数。数据类型、长度及数据范围如表 8.2 所示。

表 8.2 数据类型、长度及数据范围

进 制	表示法	典型值
十进制	[十进制数]	20047
十六进制	16#[十六进制数]	16#2A2B
二进制	2#[二进制数]	2#1111_1010_0101_1101
ASCII	'[ASCII 码文本]'	'Alao want to meto'
字符串	"[字符串文本]"	"ASCII 文本和中文"
实数	IEEE 754, 1985	+1.123B-15 (正数); -1.123C-12 (负数); 1.2; 3.6

#### 4. 常数

十进制常数如 567, 十六进制常数如 16#2BD5, 二进制常数如 2#11111111 00011111, ASCII 码如 “mat”, 实数如 +2.468E-15、-1.536495E-15 等。

#### 5. 编址方式

(1) 位编址格式: 字节号.位号, 如 I1.2、Q1.1 和 I2.0。数字量输入地址都是以 8 位为一组的。若一个模块 I/O 不是 8 的整数, 则余下的不会分配给下一模块。如 I0.0, I0.1, ..., I1.0, ...。模拟量以 16 位存储, 所以要从偶数号字节开始, 如 AIW0, AIW2, AIW4, ... 和 AQW0, AQW2, AQW4, ...。

(2) 字节编址格式: (区域标志符) B (字节号), 如 IB1 表示由 I1.0~I1.7 组成一个字节。

(3) 字编址格式: (区域标志符) W (起始字节号)。如 VW0 表示由 VB0 和 VB1 这 2 个字节组成的字。

(4) 双字编址格式: (区域标志符) D (起始字节号), 最高有效字节是起始字节。如 VD0 的含义是由 VB0、VB1、VB2、VB3 这四个字节组成的一个双字。

#### 6. 元件功能和地址分配

##### (1) 输入映像寄存器 I

输入映射寄存器 I 的作用是让 PLC 采集用户输入信号, 即暂时存放外部信号。其分配区域是从 IB0 到 IB15 的 16 个字节。PLC 上电后, 开始执行用户程序时, CPU 就执行循环扫描的采样阶段, 将外界的信息暂时放到输入继电器 I 中。

位: I[字节地址].[位地址]: I1.2。

字节、字或双字: I[长度][起始字节地址]: IB3、IW2、ID2。

##### (2) 输出映像寄存器 Q

输出映像寄存器 Q 的功能是把 PLC 的输出信号转化为带动负载动作的信号。程序执行末期, CPU 将输出过程映像寄存器中的输出传给 DC 模块。

位: Q[字节地址].[位地址]: Q0.0。

字节、字或双字: Q[长度][起始字节地址]: QB1、QW2、QD1。

##### (3) 变量存储区 V

变量存储区 V 的功能是暂时存储变量。可按字节、字或双字来保存。

位: V[字节地址].[位地址]: V10.2。

字节、字或双字: V[长度][起始字节地址]: VB100、VW100。

##### (4) 标志位存储器 M

标志位存储器 M 也称中间继电器。内部标志位存储器在 PLC 中无相应的 I/O 端, 其接通或断开仅可用内部指令来赋值, 可按字节、字或双字进行相应的存储。

位: M[字节地址].[位地址]: M26.7

字节、字或双字: M[长度][起始字节地址]: MB1、MW12、MD10。

##### (5) 特殊标志位存储器 SM

特殊标志位存储器 SM 及位的说明如表 8.3 所示。

表 8.3 特殊标志位存储器 SM 及位的说明

特殊标志位存储器 SM 的位			
SM0.0	PLC 处于 RUN 时, 该位一直保持输出	SM1.0	操作结果为 0
SM0.1	首次扫描是 ON, 可以把程序初始化	SM1.1	结果溢出或非法值
SM0.2	RAM 中的数据消失时, 给出一个扫描周期来表示出错提示	SM1.2	结果为负数
SM0.3	PLC 通电并处在 RUN 挡位, 产生一个周期脉冲输出	SM1.3	被 0 除
SM0.4	产生占空比为 50%的分时钟脉冲	SM1.4	超出表范围
SM0.5	产生占空比为 50%的脉冲	SM1.5	空表
SM0.6	时钟, 一个扫描周期为高电平和低电平	SM1.6	BCD 到二进制转换出错
SM0.7	工作方式, 0 时处于 TERM, 1 为 RUN 位置	SM1.7	ASCII 到十六进制转换出错

#### (6) SM 存储器

SM 存储器可使 CPU 和用户自编程序交换数据, 特殊标志位存储器能以 SM 来操作。

位: SM[字节地址].[位地址]: SM0.1。

字节、字或双字: SM[长度][起始字节地址]: SMB86。

#### (7) 局部变量存储器 L

局部变量存储器 L 具有 64 个比特, 用来存放局部变量。可按字节、字或双字来访问 L。

位: L[字节地址].[位地址]: L0.0。

字节、字或双字: L[长度][起始字节地址]: LB11、LW20。

#### (8) 定时器存储区 (相当于时间继电器) T

定时器的作用相当于继电器控制系统中的时间继电器, 其编址范围为 T0~T255。

位: T[定时器号]: T32。

字: T[定时器号]: T99。

#### (9) 计数器存储区 C

计数器存储区 C 的作用是输出多对常开和常闭触点供编程使用。S7-200 CPU 提供三种类型的计数器, 即增、减、增/减复合计数器, 编址范围为 C0~C255。

字节: C[计数器号]: C2。

字: C[计数器号]: C16。

#### (10) 累加器 AC

累加器 AC 保存临时数据, 通常存储当前运算结果、中间运算结果和最终数据。被操作的变量长度由访问累加器时所用的指令确定。CPU 提供了 4 个 32 位累加器。

#### (11) 顺序控制继电器 S

顺序控制继电器 S 使用步进指令控制内部元件, 完成顺序功能图程序的执行。SCR 可以控制程序的逻辑分段, 可按字节、字或双字来对 S 操作。

位: S[字节地址].[位地址]: S2.0。

字节、字或双字: S[长度][起始字节地址]: SB3、SW15。

#### (12) 模拟量输入/输出映像寄存器 (AI/AQ)

模拟量输入/输出映像寄存器 (AI/AQ) 的功能是将外部输入的温度、电压变成 1 个字 (16 位) 的数字量存入。



AI 编址范围为 AIW0, AIW2, ..., AIW62, 共有 32 个模拟量输入点。

AQ 编址范围为 AQW0, AQW2, ..., AQW62, 共有 32 个模拟输出点。

区域标志符 (AI)、数据长度 (W) 及字节的起始地址存储。输入为 1 个字长, 通常以偶数开始, 如 AIW0, AIW6, AIW8。AQ 转换的实际精度通常为 12 位。

格式: AIW[起始字节地址]: AIW8。

模拟量输出: AQ。

格式: AQW[起始字节地址]: AQW6。

### (13) 高速计数器 HC

高速计数是指高速事件的计数, 它为独立 CPU 之外的扫描时间, 包括一个 32 位的有符号整数计数值。要获得其中的数值, 就必须知道它的地址。其当前数值为只读, 通常以双字格式寻址。

格式: HC[高速计数器号]: HC1。

S7-200 CPU 存储器范围和特性一览表如表 8.4 所示。

表 8.4 S7-200 CPU 存储器范围和特性一览表

描 述	CPU 222	CPU 224/CPU 226
用户程序大小	2048 字	4096 字
用户数据大小	1024 字	2560 字
描 述	CPU 222	CPU 224/CPU 226
用户程序大小	2048 字	4096 字
用户数据大小	1024 字	2560 字
输入映像寄存器	I0.0~I15.7	
输出映像寄存器	Q0.0~Q15.7	
模拟量输入	AIW0~AIW30	AIW0~AIW62
模拟量输出	AQW0~AQW 30	AQW0~AQW62
V 存储器	V0.0~V2047.7	V0.0~V5119.7
L 存储器	L0.0~L63.7	
M 存储器	M0.0~ M 31.7	
特殊存储器 (SM)	SM 0.0~SM 179.7	
只读	SM 0.0~SM 29.7	
定时器	256 (T0~T255)	
有记忆接通间隔 1ms	T0, T64	
有记忆接通间隔 10ms	T1~T4, T65~T68	
有记忆接通间隔 100ms	T5~T31, T69~T95	
ON/OFF 间隔 1ms	T32, T96	
ON/OFF 间隔 10ms	T33~T36, T97~T100	
ON/OFF 间隔 100ms	T37~T63, T101~T255	
计数器	C0~C255	
高速计数器	HC0、HC3、HC4、HC5	HC0~HC5
顺序控制继电器 (S)	S0.0~S31.7	
累加寄存器	AC0~AC3	
跳转/标号	0~255	

## 8.5 基于 PLC 偏航系统的主要设备及系统控制要求与实现

### 8.5.1 PLC 偏航系统的主要设备及系统控制要求

风力发电机采用水平轴永磁同步发电机，其主要参数如下：功率为 300W，叶片直径为 120mm，叶片数量为 3，启动风速为 1.5m/s。单相交流电动机额定功率为 90W。PLC 选用西门子公司的 S7-200 CPU 224，编程软件采用 STEP7-Micro/winV4.0。

输入地址分配表及配置如表 8.5 所示。

表 8.5 输入地址分配表及配置

输入端口	器件名称及功能配置	输入端口	器件名称及功能配置
I0.0	旋转开关自动挡	I0.7	停止按钮
I0.1	启动按钮	I1.0	风速检测信号
I0.2	急停按钮	I1.1	侧风偏航初始位开关
I0.3	顺时针按钮	I1.2	侧风偏航 45°到位开关
I0.4	逆时针按钮	I1.3	侧风偏航 90°到位开关
I0.5	侧风偏航按钮	I1.4	风场机构顺时针到位开关
I0.6	恢复按钮	I1.5	风场机构逆时针到位开关

输出地址分配表及配置如表 8.6 所示。

表 8.6 输出地址分配表及配置

输出端口	器件名称及功能配置	输出端口	器件名称及功能配置
Q0.0	启动按钮指示灯	Q0.7	继电器 KA10 线圈
Q0.1	顺时针按钮指示灯	Q1.0	继电器 KA11 线圈
Q0.2	逆时针按钮指示灯	Q1.1	继电器 KA12 线圈
Q0.3	侧风偏航按钮指示灯	1M	0V
Q0.4	恢复按钮指示灯	2M	0V
Q0.5	停止按钮指示灯	1L	+24V
Q0.6	继电器 KA9 线圈	2L	+24V

### 8.5.2 基于 PLC 偏航系统的程序实现

PLC 控制的程序流程图如图 8.13 所示。

PLC 梯形图程序如图 8.14~图 8.29 所示。

学习 PLC 必须要动手编程和上机调试。西门子 PLC 的仿真软件是验证和调试程序的理想工具，其主界面如图 8.30 所示。

(1) 打开西门子 S7-200 仿真软件，在“配置”下拉菜单中选定 CPU 型号 224，如图 8.31 所示。

(2) 载入程序，启动并打开自动挡，RUN 指示灯点亮，在“程序”下拉菜单中选择载入已编写好的梯形图程序，单击绿色的运行程序图标，程序就会自动运行。

按下来自动启动按钮 I0.1，启动按钮对应的输出灯 Q0.0 亮，顺时针按钮对应的输出灯

Q0.1 亮，对应侧风偏航的输出灯 Q0.3 亮，对应风力发电顺时运动的输出线圈 Q0.6 和对应侧风偏航的启动线圈 Q1.0 亮。仿真软件的运行如图 8.32 所示。

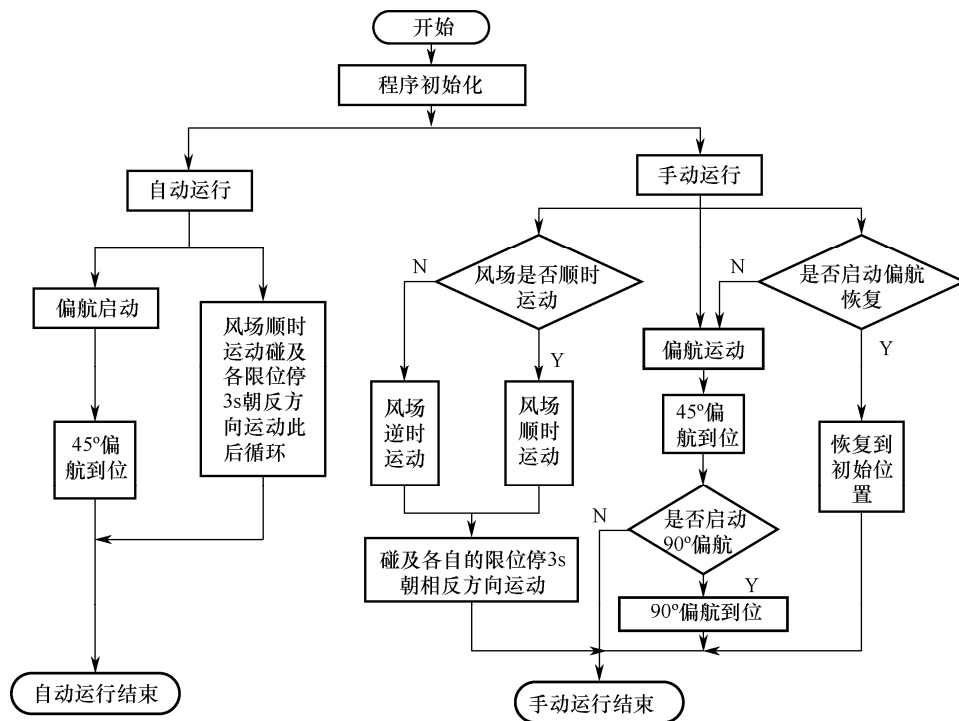


图 8.13 PLC 控制的程序流程图

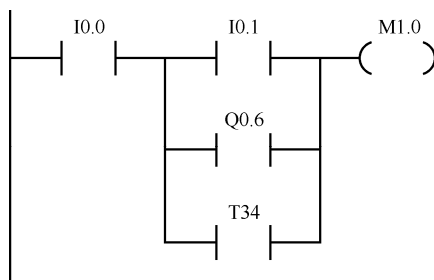


图 8.14 自动状态使用启动键顺时动作 LAD

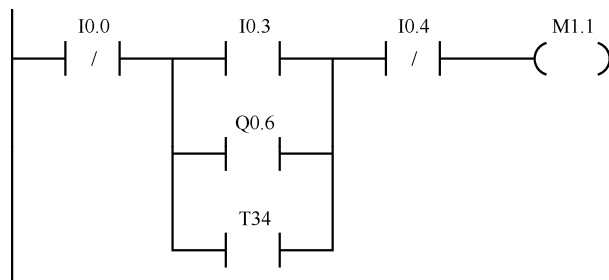


图 8.15 手动状态顺时键顺时运行 LAD

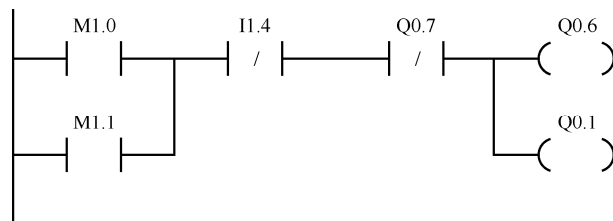


图 8.16 手动和自动时顺时运行输出线圈及顺时键输出 LAD

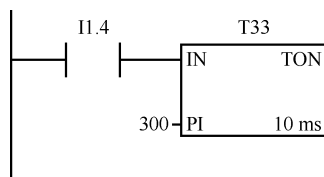


图 8.17 顺时运行到达预设位置时停 3s LAD

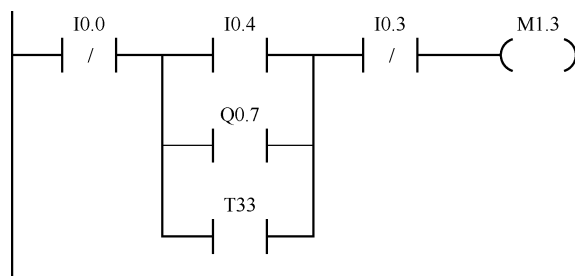


图 8.18 手动下逆时键逆时 LAD

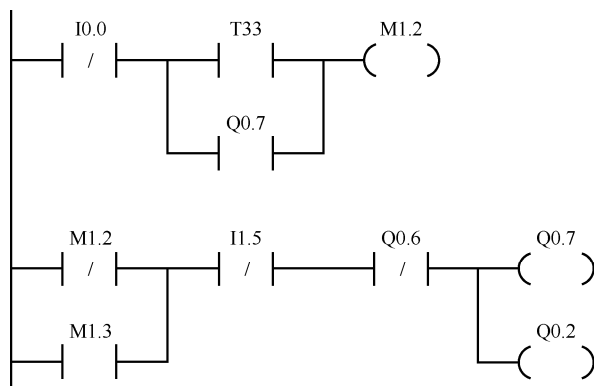


图 8.19 手动下逆时和到达顺时极限后的逆时输出线圈及其输出 LAD

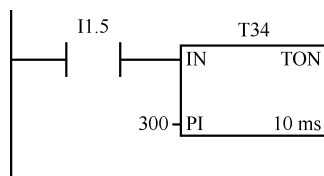


图 8.20 逆时运行到设定位置停 3s LAD

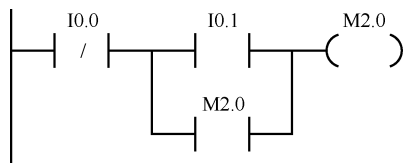


图 8.21 自动状态侧风偏航 LAD

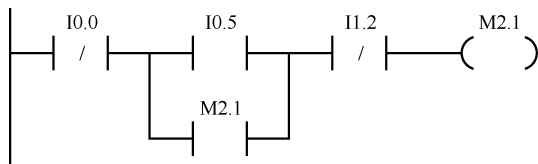


图 8.22 手动状态侧风偏航 LAD

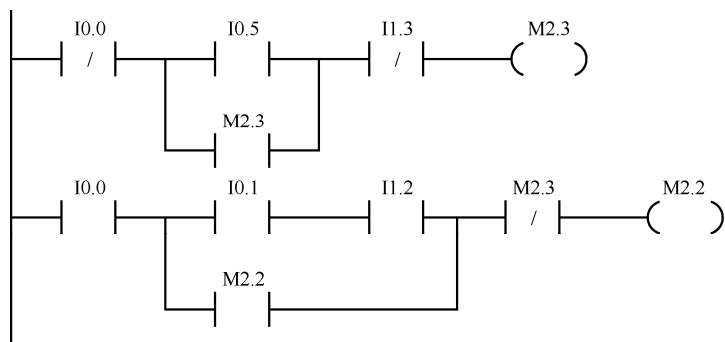


图 8.23 手动状态偏航至 90° LAD

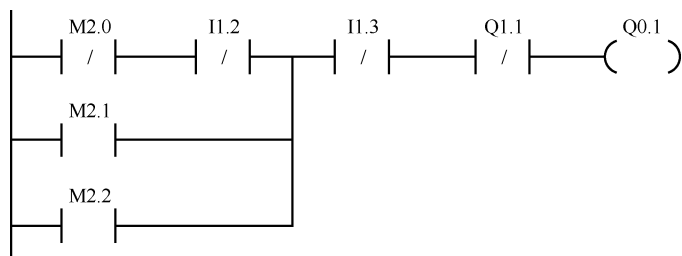


图 8.24 手动控制下侧风偏航输出 LAD

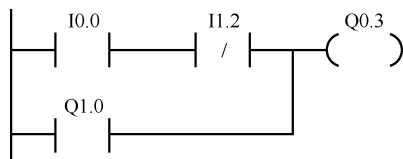


图 8.25 偏航输出 LAD

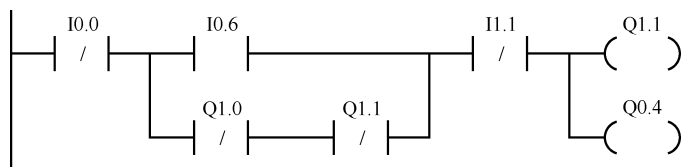


图 8.26 手动状态偏航恢复键下偏航恢复输出和其指示 LAD

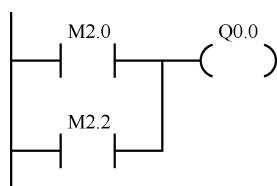


图 8.27 启动键输出 LAD

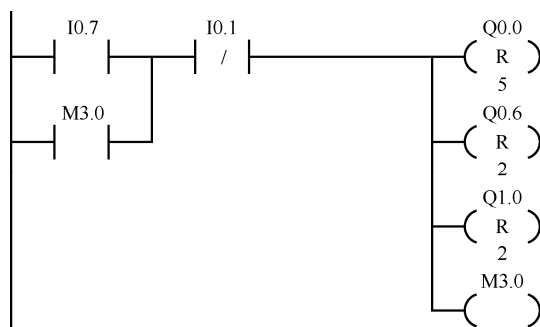


图 8.28 停止程序键输出 LAD

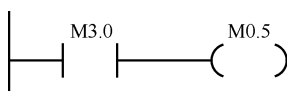


图 8.29 停止键指示灯控制 LAD

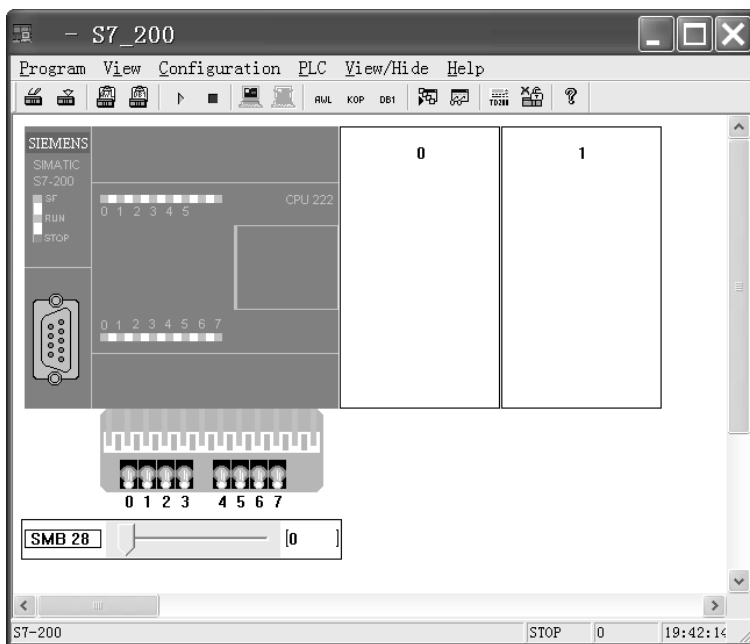


图 8.30 西门子 S7-200 仿真软件主界面

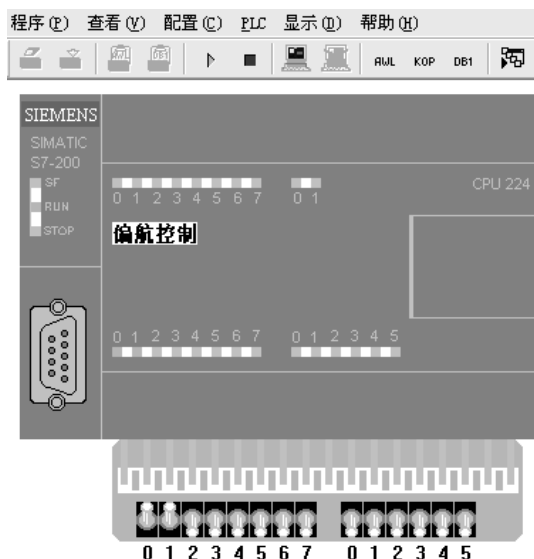


图 8.31 仿真配置 CPU 224 窗口

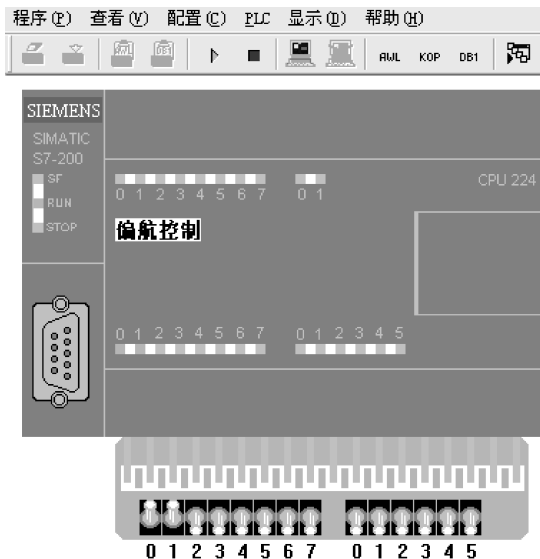


图 8.32 自动状态下的仿真

(3) 自动状态下偏航  $45^\circ$  到位状态时, 相应的输出指示灯熄灭。软件仿真对应输出如图 8.33 所示。

(4) 手动风场顺时启动。首先手动输入顺时对应的按键 I0.3, 相应的顺时输出灯 Q0.1 亮, 顺时继电器线圈 Q0.6 通电, 同理, 手动按下逆时按钮 I0.4, 逆时指示灯 Q0.2 亮, 顺时继电器线圈 Q0.7 通电。以上仿真过程如图 8.34 所示。

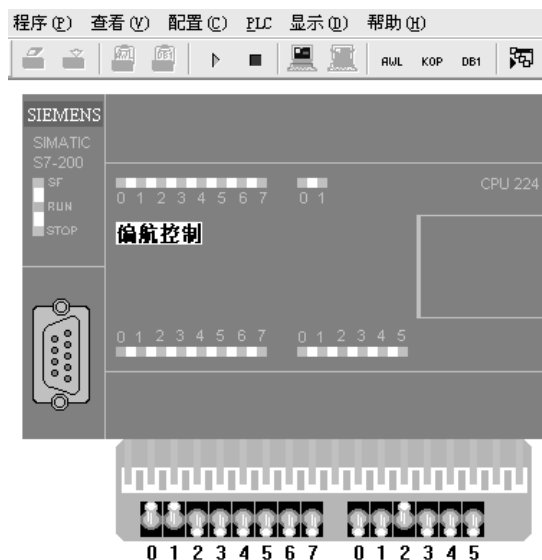
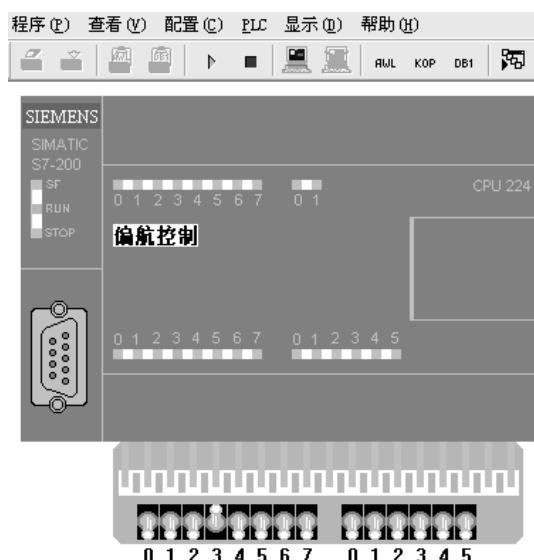

 图 8.33 自动偏航  $45^\circ$  到位状态


图 8.34 手动风场顺时启动仿真

(5) 手动偏航  $45^\circ$  到位状态的仿真过程与自动偏航  $45^\circ$  到位状态的仿真过程相同。

(6) 自动状态下  $45^\circ$  到位后再按下自动启动按钮。手动状态下  $45^\circ$  偏航到位后, 手动输入自动启动按钮 I0.1, 侧风偏航继续启动, 运行到  $90^\circ$  偏航到位后 I1.3 停止。以上仿真过程如图 8.35 所示。

(7) 手动运行偏航恢复仿真。手动状态下, 恢复按钮输入 I0.6, 恢复指示灯 Q0.4 亮, 偏航恢复继电器线圈 Q1.1 通电, 恢复到位按钮 I1.1 输出灯灭。以上仿真过程如图 8.36 所示<sup>[34-36]</sup>。

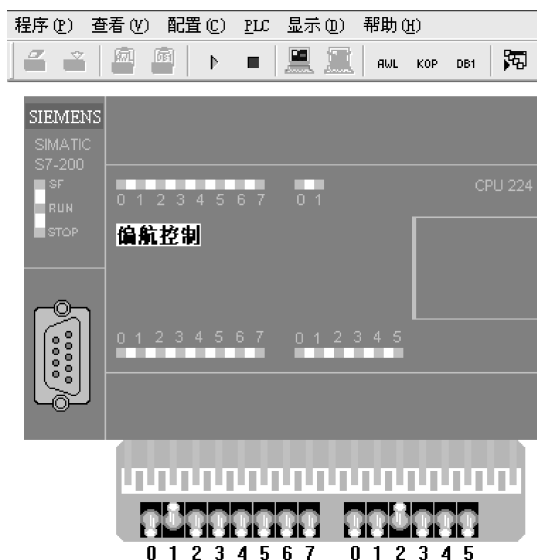


图 8.35 手动 90°偏航过程仿真

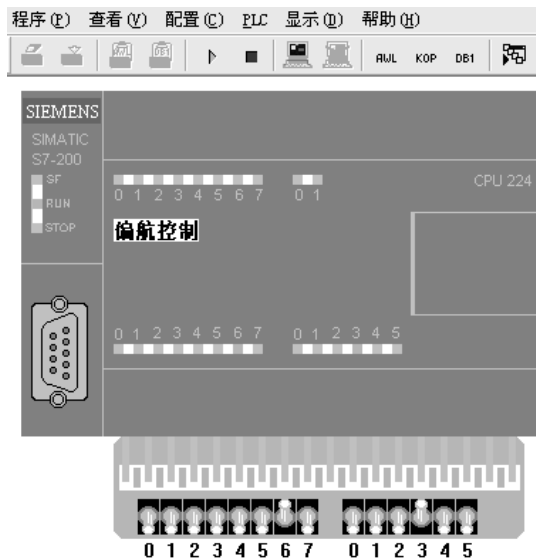


图 8.36 手动运行偏航恢复仿真

### 8.5.3 偏航驱动电气控制原理

图 8.37 所示为常见偏航电动机的主回路电气控制原理图。

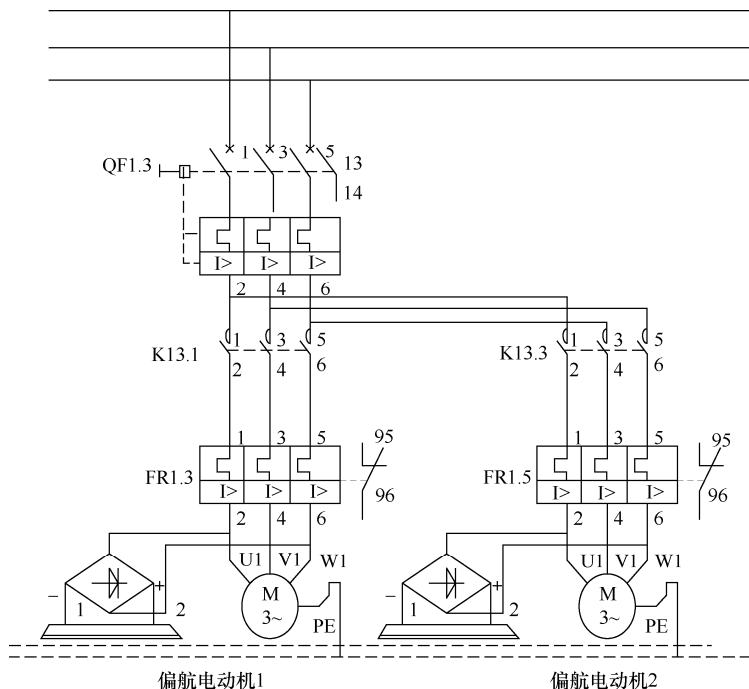


图 8.37 偏航电动机主回路电气控制原理图



图中, QF1.3 是控制偏航三相交流电动机通断电的断路器, 常开触点 13 和 14 是断路器 QF1.3 的辅助触点, K13.1 和 K13.3 分别是控制偏航电动机 1 和偏航电动机 2 的接触器的主触点, 其线圈由专门的电源供电, 动断辅助触点分别串联在对方的线圈供电电路上, FR1.3 和 FR1.5 分别是两台偏航电动机热继电器的感温元件, 95 和 96 是两个热继电器的辅助常闭触点, 用来保护电动机的过载。偏航电动机左侧为电磁刹车机构的整流桥电路。所有辅助触点均串联接入偏航过载检测回路, 用以检测在偏航过程中是否发生过载现象。

动力电缆经过断路器 QF1.3 后, 分别连接左右偏航接触器端子, 两个接触器的电动机侧端子使用导线对应连接。两个接触器 K13.1 和 K13.3 的母线侧三相接线必须交换相序, 电动机侧接线相序相同, 这时可以实现不同接触器吸合时偏航电动机的不同转向。

机舱需要向左偏航时, 控制模块向 K13.1 线圈供电, 主触点动作闭合, 偏航电动机通电开始动作, 机舱偏航; 同时 K13.1 辅助触点断开, 使得 K13.3 在任何情况下均不能吸合主触点, 避免发生三相短路。机舱右偏航与上述原理相同。

# 参考文献

- [1] 霍志红等. 风力发电机组控制技术[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2010.
- [2] 叶杭冶. 风力发电机组的控制技术2版[M]. 北京: 科学出版社, 2007.
- [3] 叶杭冶等. 风力发电系统的设计、运行与维护[M]. 北京: 电子工业出版社, 2011.
- [4] 姚兴佳, 宋俊. 风力发电机组原理与应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2011.
- [5] 任清晨. 风力发电机组工作原理和技术基础[M]. 北京: 机械工业出版社, 2010.
- [6] 任清晨. 风力发电机组安装、运行与维护[M]. 北京: 机械工业出版社, 2010.
- [7] 邵联合. 风力发电机组运行维护与调试[M]. 北京: 化学工业出版社, 2012.
- [8] 吴佳梁等. 风力机安装维护与故障诊断[M]. 北京: 化学工业出版社, 2011.
- [9] 薛年喜. MATLAB 在数字信号处理中的应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2003.
- [10] 丁玉美, 高西全. 数字信号处理[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2001.
- [11] 李维波. MATLAB 在电气工程中的应用[M]. 北京: 中国电力出版社, 2007.
- [12] 王忠孔, 段慧达等. MATLAB 应用技术: 在电气工程与自动化专业中的应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2007.
- [13] 张亮, 郭仕剑等. MATLAB 7.x 系统建模与仿真[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2006.
- [14] 王兆安等. 电力电子技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2007.
- [15] 洪乃刚等. 电力电子和电力拖动控制系统的 MATLAB 仿真[M]. 北京: 机械工业出版社, 2006.
- [16] 周双喜, 鲁宗相. 风力发电与电力系统[M]. 北京: 中国电力出版社, 2011.
- [17] 贺益康等. 并网双馈异步风力发电机运行控制[M]. 北京: 中国电力出版社, 2012.
- [18] 赵文辉. 风电场输出功率的组合预测研究[D]. 华北电力大学, 2013.
- [19] 冯晨等. 直驱风力发电机组低电压穿越实现方案综述[J]. 华北电力技术, 2013(9): 59-64.
- [20] 汪旭旭等. 风力发电技术发展综述[J]. 电气开关, 2013, 51(3): 16-19.
- [21] 孙屹刚著. 风力发电技术及其 MATLAB 与 Bladed 仿真[M]. 北京: 电子工业出版社, 2013.
- [22] 张学敏等. MATLAB 基础及应用 (第2版) [M]. 北京: 中国电力出版社, 2011.
- [23] 赵博等. Ansoft 12在工程电磁场中的应用[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2012.
- [24] 徐海亮, 章玮, 胡家兵等. 电网电压不平衡及谐波畸变时基波电压同步信号的检测[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(5): 90-95.
- [25] 刁统山. 新型永磁双馈发电机及其控制策略研究[D]. 山东大学, 2013.
- [26] 赵军伟. 异步起动永磁同步电动机齿槽转矩的研究[D]. 山东大学, 2012.
- [27] 洪翠等. 风电场风速及风电功率预测方法研究综述 [J]. 电网与清洁能源, 2011, 27(1): 60-66.
- [28] Lie Xu, Phillip Cartwright. *Direct Active and Reactive Power Control of DFIG for Wind Energy Generation*. IEEE Transactions on Conversion, 2006, 21 (9): 750-758.
- [29] Dawei Zhi, Lie Xu. *Direct Power Control of DFIG with Constant Switching Frequency and Improved Transient Performance*. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2007, 22(1): 110-118.

- [30] 周鹏. 双馈异步风力发电系统低电压穿越技术研究[D]. 浙江大学, 2011.
- [31] Peterson A, Harnfors L, Thiringer T. *Evaluation of Current Control Methods for Wind Turbines using Doubly-fed Induction Machines* [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2005, 20(1): 227-235.
- [32] 刘其辉, 贺益康, 张建华. 交流励磁变速恒频风力发电机的运行控制与建模仿真[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(5): 43-50.
- [33] 胡家兵, 孙丹, 贺益康等. 电网电压骤降故障下双馈风力发电机建模与控制[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(8): 21-25.
- [34] 王秀丽著. 风电控制技术研究与实践[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2013.
- [35] 赵宇, 王奔, 仇乐兵等. 基于变结构控制的变速恒频双馈风力发电机并网控制[J]. 电力自动化设备, 2010, 30(9): 77-81.
- [36] 邵联合等. 风力发电机组运行与维护[M]. 北京: 中国电力出版社, 2014.

